
Untersuchung der solarenergetischen Effizienz einer Membrandestillationsanlage in Namibia



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Bachelor-Thesis

Eingereicht von Johannes Schwab

Matrikelnummer: 1671661

Studiengang: B.sc. Umweltingenieurwissenschaften

Tag der Einreichung: 13.09.2012

Gutachter: Herr Prof. Dipl. Ing. Dr. nat. techn. Wilhelm Urban

Betreuer: Herr Marian Brenda

Untersuchung der solarenergetischen Effizienz einer
Membrandestillationsanlage in Namibia
Bachelor-Thesis

Eingereicht von Johannes Schwab

Matrikelnummer: 1671661

Studiengang: B.sc. Umweltingenieurwissenschaften

Tag der Einreichung: 13.09.2012

Gutachter: Herr Prof. Dipl. Ing. Dr. nat. techn. Wilhelm Urban

Betreuer: Herr Dipl. Ing. Marian Brenda

Technische Universität Darmstadt
Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie
Institut WAR
Fachgebiet Wasserversorgung und Grundwasserschutz

Zusammenfassung

Im Norden Namibias, vor allem in der Etosha-Salzpflanze, ist das Grundwasser stark salzhaltig. Teilweise ist der Salzgehalt sogar höher als der des Meerwassers. Im Zuge des Verbundprojektes CUVewaters, das mit Hilfe eines integrierten Wasserressourcenmanagements die Wasserversorgung in diesem Gebiet verbessern soll, wurden verschiedene Anlagen in diesem Gebiet implementiert. Mittlerweile gibt es in Akutsima eine Mehrfachverdampfungsanlage der Firma Terrawater GmbH und eine mehrstufige Entsalzungsanlage des Solar Instituts Jülich. In dem Ort Amarika gibt es außerdem eine Umkehrosmoseanlage der proaqua GmbH sowie eine Membrandestillationsanlage des Fraunhofer Instituts für solare Energiesysteme.

Im Zuge dieser Arbeit soll anhand von Messdaten die solarenergetische Effizienz der Membrandestillationsanlage näher betrachtet werden. Das Ziel ist hierbei das Aufstellen einer Energiebilanz sowie die Festlegung eines solarenergetischen Wirkungsgrades der Solarkollektoren. Außerdem wird die Effizienz in Form von Gained Output Ratio- (GOR-) Werten beziffert.

Um die besagten Werte zu berechnen, wird zunächst eine theoretische Grundlage geschaffen, indem die Themenbereiche Wärmeübertragung, Thermodynamik, Sonneneinstrahlung und Wasserentsalzung eingehend dargestellt werden.

Der zweite Teil der Arbeit betrifft die Datenauswertung. Hier werden die Messreihen des Fraunhofer ISE genauer betrachtet. Diese Messreihen beinhalten die Betriebsdaten der Membrandestillationsanlage. Mit Hilfe dieser Daten wird an verschiedenen Stellen die dort vorhandene Energie berechnet, damit eine überschlägige Energiebilanz aufgestellt werden kann. Des Weiteren wird versucht, mit Hilfe der berechneten Wärmeströme eine Aussage über die Effizienz zu treffen. Dies geschieht mit Hilfe der Festlegung eines Kollektorwirkungsgrades und der GOR-Werte. Diese GOR-Werte geben die Wärmerückgewinnung bei der Destillatproduktion an.

Schlüsselwörter: Wasserentsalzung, Membrandestillation, Sonneneinstrahlung, Thermodynamik

Abstract

In Northern Namibia and particularly in the Etosha Saltpan the groundwater is very salty.

In some areas the salt content of the groundwater is even higher than the salt content of the seawater. In the course of the CUVewaters joint research project, which is supposed to improve the water supply with an integrated water resource management, four different plants have been implemented. By now there is a multi evaporation plant constructed by the Terrawater GmbH and a Multi Stage Desalination plant from the Solar-Institute Jülich at Akutsuma. In Amarika they have a reverse osmosis plant from the proaqua GmbH and a membrane desalination plant from the Fraunhofer institute for solar energy systems.

In the course of this paper the solar energetic efficiency of the membrane distillation plant will be demonstrated with the help of performance data. The aim is to draw an energy balance as well as to define the degree of efficiency supplied by the solar cells. In addition the efficiency is indicated as GOR-data.

In order to calculate this data, first a theoretical basis will be provided. For that purpose the subject areas of heat transfer, thermodynamics, solar radiation and water desalination will be explained.

The second part of this paper will be about the data evaluation and for that reason the collected data of the Fraunhofer ISE will be evaluated. This data contain the operating data of the membrane distillation plant. With their help the available energy will be calculated for different components of the plant to enable the estimation of an energy balance. Furthermore, a conclusion on the degree of efficiency will be drawn by means of the calculated heat flows and the GOR-data. The GOR-values indicate the heat recovery during the distillate production.

Keywords: water desalination, membrane distillation, solar radiation, thermodynamics

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG	V
ABSTRACT	VI
INHALTSVERZEICHNIS	VII
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IX
TABELLENVERZEICHNIS	X
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XI
MATHEMATISCHE ABKÜRZUNGEN UND DEREN EINHEITEN	XII
FORMELVERZEICHNIS	XIII
1 EINFÜHRUNG	1
1.1 NAMIBIA UND DAS CUVELAI-ETOSHA-BECKEN	1
1.2 CUVEWATERS WASSERENTSALZUNG	2
2 GRUNDLAGEN	3
2.1 THERMODYNAMIK	3
2.1.1 SPEZIFISCHE WÄRMEKAPAZITÄT	3
2.1.1.1 Abhängigkeit von Temperatur und Salinität	4
2.1.2 DIE DICHTEN	5
2.1.2.1 Abhängigkeit von Temperatur und Salinität	6
2.1.3 ELEKTRISCHE LEITFÄHIGKEIT VON SALZWASSER	7
2.1.4 WÄRMESTROM UND WÄRMEÜBERTRAGUNG	8
2.1.5 MASSENSTROM	10
2.2 SOLARSTRAHLUNG	11
2.2.1 SCHWARZKÖRPER	11
2.2.2 EXTRATERRESTRISCHE STRAHLUNG	12
2.2.3 TERRESTRISCHE STRAHLUNG	14
2.2.4 DIE STRAHLUNGSLEISTUNG DER SONNE	15
2.2.5 BERECHNUNG DER GLOBALSTRAHLUNG	17
2.3 SONNENKOLLEKTOREN	17
2.3.1 ABSORBEROBERFLÄCHEN	18
2.3.2 DER FLACHKOLLEKTOR	18
2.3.3 DER WIRKUNGSGRAD	19
2.4 WASSERENTSALZUNG	20
2.4.1 HINTERGRUND	20
2.4.2 MÖGLICHKEITEN DER ENTSALZUNG	21
2.4.2.1 Umkehrosmose	23
2.4.2.2 Membrandestillation	24
2.4.3 GAINED OUTPUT RATIO (GOR)	25
3 DATENAUSWERTUNG	26
3.1 DATENGRUNDLAGE	26
3.2 BESCHREIBUNG DER IN NAMIBIA IN BETRIEB GENOMMENEN MEMBRANDESTILLATIONSANLAGE	27
3.2.1 DER KOLLEKTORKREISLAUF	27
3.2.2 DER SPEICHERKREISLAUF	28

3.2.3	DER ENTSALZUNGSKREISLAUF	29
3.3	DIE UNTERSCHIEDLICHEN BETRIEBSZUSTÄNDE	29
3.3.1	BETRIEB IN DEN MORGENSTUNDEN	30
3.3.2	TEMPERATUR AM THERMOSTATVENTIL STEIGT ÜBER 75°C	30
3.3.3	BETRIEB IN DEN ABENDSTUNDEN	30
3.3.4	BETRIEB OHNE GLOBALSTRAHLUNG	31
3.4	ENERGETISCHE AUSWERTUNG DER ANLAGE	31
3.4.1	BETRIEB DER ANLAGE	31
3.4.2	BERECHNUNG DES WÄRMESTROMS IM ENTSALZUNGSKREISLAUF	34
3.4.3	BERECHNUNG DES WÄRMESTROMS IM KOLLEKTORKREISLAUF	35
3.4.4	BERECHNUNG DES WÄRMESTROMS IM KOLLEKTORKREISLAUF MIT HILFE DES STEFAN-BOLTZMANN-GESETZES	38
3.4.5	BESCHREIBUNG DER VAKUUM-FLACHKOLLEKTOREN	39
	ECOSOL 2.32	39
3.4.6	GEGENÜBERSTELLUNG DER WÄRMESTRÖME IM KOLLEKTORKREISLAUF	41
3.4.7	GOR-WERTE DER ENTSALZUNGSMODULE	43
3.4.8	BERECHNUNG DER WIRKUNGSGRAD E	45
3.4.9	VERGLEICH DER MAßGEBLICHEN WIRKUNGSGRAD E MIT DEN DATEN DES HERSTELLERS	48
3.4.10	ENERGIEBILANZ	50
4	FAZIT	53
ANHANG		I
A.	FLIEßDIAGRAMME	I
	DER KOLLEKTORKREISLAUF	I
	DER SPEICHERKREISLAUF	II
	DER ENTSALZUNGSKREISLAUF	III
	ALLE KREISLÄUFE	IV
B.	DATENQUALITÄT	V
	NOVEMBER 2010	V
	JULI 2011	VII
	DEZEMBER 2011	IX
C.	WÄRMESTRÖME	XI
	NOVEMBER 2010	XI
	JULI 2011	XVII
	DEZEMBER 2011	XXIII
LITERATURVERZEICHNIS		XXIX

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 : Namibia und die Etosha-Salzpflanze. Quelle: Meyers Weltatlas: Die Erde im Großformat.....	2
Abbildung 2 : Dichte von Salzwasser in Abhängigkeit von der Temperatur(vgl. Hömig, H.-E., 1978, S.26).....	7
Abbildung 3 : Elektrische Leitfähigkeit von Salzwasser (vgl. Hömig, H.-E., 1978, S. 38)	8
Abbildung 4 : Schaltbilder. Links Gegenstromwärmeübertrager, rechts Gleichstromwärmeübertrager (vgl. Cerbe, G./Wilhelms, G., 2011, S.391).....	9
Abbildung 5 : Schaltbild eines Kreuzstromwärmeübertragers (vgl. Cerbe, G./Wilhelms, G., 2011, S.392)	10
Abbildung 6 : Spezifische spektrale Einstrahlungsdichte am Rand der Erdatmosphäre der Solarstrahlung und einer äquivalenten Schwarzkörperstrahlung, jeweils senkrecht zur Einstrahlungsfläche (Herwig, H./Moschallski, A., 2009, S.186)	13
Abbildung 7 : Einfluss der Erdatmosphäre auf die extraterrestrische Solarstrahlung (Vgl. Herwig, H./Moschallski, A., 2009, S.188).....	15
Abbildung 8 : Spektrale Strahlungsdichte der Sonne $E(\lambda)_\lambda$ außerhalb und innerhalb der Atmosphäre im Vergleich zur Schwarz-Körper-Strahlung (Wagemann, H.-G./Eschrich, H., 2010, S.12).....	16
Abbildung 9 : Klassifizierung der Entsalzungstechnologien (vgl. Cipollina, A. et. al., 2009, S.7).	23
Abbildung 10 : Funktionsweise der Umkehrosmose (vgl. Sturm, M.).....	24
Abbildung 11 : Prinzip einer Direktkontakt-Membrandestillation (vgl. Cipollina, A. et. al., 2009, S.166)	24
Abbildung 12 : Gegenüberstellung der Eckdaten des Entsalzungskreislaufs am 12.07.11 (sonnig).33	
Abbildung 13 : Gegenüberstellung der Eckdaten des Entsalzungskreislaufes am 19.11.10 (wolkig)	33
Abbildung 14 : Q1,2C am 10.12.2011	38
Abbildung 15 : Wirkungsgrad nach Angaben des Herstellers (vgl. www.me-systems.eu)	41
Abbildung 16 : Mittelwerte der Wärmeströme (kWh) an der heißen Seite des WÜ1.....	41
Abbildung 17 : Gained Output Ratio der drei Monate	43
Abbildung 18 : Verlauf der GOR-Werte	44
Abbildung 19 : Kollektorwirkungsgrade	45
Abbildung 20 : Verlauf der Kollektorwirkungsgrade.....	46
Abbildung 21 : Maßgebliche Kollektorwirkungsgrade	47
Abbildung 22 : Temperaturdifferenz $\Delta T = T_{\text{coll_sig}} - T_{\text{amb}}$, für den 10.12.11.....	48
Abbildung 23 : Temperaturdifferenz $\Delta T = T_{\text{coll_sig}} - T_{\text{amb}}$, für den 19.11.10.....	49
Abbildung 24 : Temperaturdifferenz $\Delta T = T_{\text{coll_sig}} - T_{\text{amb}}$, für den 12.07.11.....	49
Abbildung 25 : Energiebilanz 19. November 2010	50
Abbildung 26 : Energiebilanz 12. Juli 2011	51
Abbildung 27 : Energiebilanz 10. Dezember 2011	52

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1 : Wahre spezifische Wärmekapazität c_p einiger fester und flüssiger Stoffe (vgl. Cerbe, G./Wilhelms, G., 2011, S.70).....</i>	<i>4</i>
<i>Tabelle 2 : Spezifische Wärmekapazität von Salzwasser [kcal/(kg*K)] (vgl. Hömig, H.-E., 1978, S.33).....</i>	<i>5</i>
<i>Tabelle 3 : Dichte von Salzwasser in Abhängigkeit von der Temperatur [g/cm³] (vgl. Hömig, H.-E., 1978, S. 25)</i>	<i>7</i>
<i>Tabelle 4 : Emissionskoeffizient senkrecht zur Fläche ϵ_n für einige Körper (Cerbe, G./Wilhelms, G., 2011, S.383).....</i>	<i>12</i>
<i>Tabelle 5 : Wirkungsgrade verschiedener Kollektoren (vgl. www.solarserver.de/).....</i>	<i>20</i>
<i>Tabelle 6 : Technische Daten der Solarkollektoren Ecosol 2.32.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabelle 7 : Datenqualität November 2010</i>	<i>V</i>
<i>Tabelle 8 : Bemerkungen zu den einzelnen Tagen im November 2010.....</i>	<i>VI</i>
<i>Tabelle 9 : Datenqualität Juli 2011.....</i>	<i>VII</i>
<i>Tabelle 10 : Bemerkungen zu den einzelnen Tagen im Juli 2011.....</i>	<i>VIII</i>
<i>Tabelle 11 : Datenqualität Dezember 2011.....</i>	<i>IX</i>
<i>Tabelle 12 : Bemerkungen zu den einzelnen Tagen im Dezember 2011.....</i>	<i>X</i>
<i>Tabelle 13 : Auswertung November Teil 1.....</i>	<i>XI</i>
<i>Tabelle 14 : Auswertung November Teil 2.....</i>	<i>XII</i>
<i>Tabelle 15 : Auswertung November Teil 3.....</i>	<i>XIII</i>
<i>Tabelle 16 : Auswertung November Teil 4.....</i>	<i>XIV</i>
<i>Tabelle 17 : Auswertung November Teil 5</i>	<i>XV</i>
<i>Tabelle 18 : Auswertung November Teil 6.....</i>	<i>XVI</i>
<i>Tabelle 19 : Auswertung Juli Teil 1</i>	<i>XVII</i>
<i>Tabelle 20 : Auswertung Juli Teil 2</i>	<i>XVIII</i>
<i>Tabelle 21 : Auswertung Juli Teil 3</i>	<i>XIX</i>
<i>Tabelle 22 : Auswertung Juli Teil 4</i>	<i>XX</i>
<i>Tabelle 23 : Auswertung Juli Teil 5</i>	<i>XXI</i>
<i>Tabelle 24 : Auswertung Juli Teil 6</i>	<i>XXII</i>
<i>Tabelle 25 : Auswertung Dezember Teil 1</i>	<i>XXIII</i>
<i>Tabelle 26 : Auswertung Dezember Teil 2</i>	<i>XXIV</i>
<i>Tabelle 27 : Auswertung Dezember Teil 3</i>	<i>XXV</i>
<i>Tabelle 28 : Auswertung Dezember Teil 4</i>	<i>XXVI</i>
<i>Tabelle 29 : Auswertung Dezember Teil 5</i>	<i>XXVII</i>
<i>Tabelle 30 : Auswertung Dezember Teil 6</i>	<i>XXVIII</i>

Abkürzungsverzeichnis

ff	nach einer Seitenzahl: und folgende
Seiten	
Hrsg.	Herausgeber
S.	Seite
u.a.	unter anderem
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel
bzw.	beziehungsweise
Fraunhofer ISE	Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme
bzgl.	bezüglich
bspw.	beispielsweise
MED	Vielfachverdampfungsanlage
MEH	Mehrfachverdampfungsanlage
MD	Membrandestillationsanlage
MSF	Mehrstufen Entspannungsverdampfungsverfahren
MVC	Mechanische Brüdenkompressionsanlage
TVC	Thermische Brüdenkompressionsanlage

Mathematische Abkürzungen und deren Einheiten

E_0, a	Solarkonstante	$\frac{W}{m^2}$
I_{Global}	Globalstrahlung	$\frac{W}{m^2}$
\dot{m}	Massenstrom	$\frac{kg}{s}$
T_s	Temperatur eines Schwarzkörpers	K
T_w	Temperatur des Wassers	°C
T_{SO}	Temperatur der Sonne	K
Q	Volumenstrom	$\frac{m^3}{s}$
\dot{Q}	Wärmestrom	kWh
λ	Wellenlänge	μm
P_s	Bestrahlungsleistung	W
R_e	Erdradius	m
R_{se}	Mittlere Entfernung zwischen den Mittelpunkten von Sonne und Erde	m
S	Salinität des Wassers	$\frac{g \text{ gelöstes Salz}}{Kg \text{ Salzwasser}}$
σ	Boltzmann-Konstante	$\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$
ν	Frequenz	s^{-1}
c_o	Lichtgeschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
c_p	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$\frac{kJ}{kg \cdot K}$
c_v	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen	$\frac{kJ}{kg \cdot K}$
ρ	Dichte	$\frac{kg}{m^3}$
Δt	Zeitintervall	s

Formelverzeichnis

Formel 1 : Spezifische Enthalpie	3
Formel 2 : Spezifische innere Energie.....	3
Formel 3 : Differenziation der spezifischen Enthalpie.....	3
Formel 4 :Differenziation der spezifischen inneren Energie.....	3
Formel 5 : Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen	3
Formel 6 : Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck.....	4
Formel 7 : Berechnung der spezifischen Wärmekapazität	4
Formel 8 : Hilfsgleichung A zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität	5
Formel 9 : Hilfsgleichung B zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität	5
Formel 10 : Hilfsgleichung C zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität.....	5
Formel 11 : Hilfsgleichung D zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität	5
Formel 12 : Die Dichte	6
Formel 13 : Berechnung der Dichte mit Hilfe des Tschebycheff-Polynoms	6
Formel 14 : Berechnung der ersten Tschebycheff- Variablen	6
Formel 15 : Berechnung der zweiten Tschebycheff- Variablen.....	6
Formel 16 : Berechnung der dritten Tschebycheff- Variablen.....	6
Formel 17 : Berechnung der vierten Tschebycheff- Variablen.....	6
Formel 18 : Temperaturfaktor.....	6
Formel 19 : Salinitätsfaktor.....	6
Formel 20 : Temperaturdifferenz zwischen Fluid a und Fluid b	9
Formel 21 : Ansatz Wärmestrom.....	10
Formel 22 : Wärmestrom Differenzialgleichung	10
Formel 23 : Wärmestrom kW.....	10
Formel 24 : Berechnung des Massenstroms.....	11
Formel 25 : Stefan-Boltzmann-Gleichung, spezifische Ausstrahlung für schwarze Körper.....	12
Formel 26 : Stefan-Boltzmann-Gleichung für graue Körper	12
Formel 27 : Spektrale Energiedichte nach dem Plankschen Strahlungsgesetz in Abhängigkeit der Frequenz.....	13
Formel 28 : Spektrale Energiedichte in Abhängigkeit der Wellenlänge nach Planck.....	13
Formel 29 : Stefan-Boltzmann-Gesetz	15
Formel 30 : Verhältnis Erd- zu Sonnenradius	15
Formel 31 : Konstante Sigma des Stefan-Boltzmann-Gesetzes	15
Formel 32 : Wärmestrom der Sonne	17
Formel 33 : Sonnenenergie.....	17
Formel 34 : Berechnung der GOR-Werte.....	25
Formel 35 : Bilanzgleichung zur Berechnung des Q1C.....	36
Formel 36 : Bilanzgleichung zur Berechnung des Q2H.....	36
Formel 37 : Berechnung der in den Tank eingespeisten Energiemenge.....	36
Formel 38 : Boltzmann-Gesetz angepasst.....	39

1 Einführung

Die Ressource Wasser ist ein immer knapper werdendes Gut, das einen erheblichen Einfluss auf die Gesundheit des Menschen hat. Aus diesem Grund ist die Bedeutung von Wasser in ökologischer und ökonomischer Sicht immens groß. Durch eine stetige Zunahme der Weltbevölkerung ist eine Art Wasserkrise entstanden. Es gibt zwar prinzipiell genug Wasser, leider ist es aber nicht gleichmäßig auf der Erde verteilt. Es gibt einige Gegenden, in denen eine Wasserknappheit herrscht. Außerdem hat eine ineffiziente Nutzung des Wassers einen beachtlichen Einfluss auf die Wasserknappheit.

IWRM bedeutet integriertes Wasserressourcenmanagement. Dieser Begriff bezeichnet ein theoretisches Konzept, das sich den effizienten Umgang mit Wasser zum Ziel gesetzt hat. Eine der grundlegenden Herausforderungen besteht darin, einen nachhaltigen Umgang mit Wasser zu erreichen. Das bedeutet, dass am Abend genauso viel Wasser vorhanden ist, wie am Morgen desselben Tages vorhanden war. Dies kann allerdings nur durch die Erfüllung der Forderung nach transsektoraler, transtemporaler und translokaler Integrität erfolgen.

1.1 Namibia und das Cuvelai-Etosha-Becken

Die Republik Namibia befindet sich im Südwesten Afrikas. Sie grenzt im Norden an Angola, im Osten an Botswana und im Süden an Südafrika. Im Westen befindet sich die Küste des atlantischen Ozeans. Namibia erstreckt sich über eine Größe von 824.116 km² und hat etwa 2,1 Millionen Einwohner. Das ergibt eine Einwohnerdichte von 2,55 Einwohnern pro km². Allein aus diesen Zahlen lässt sich erkennen, dass es eine Menge abgelegener Gegenden in Namibia gibt, wie etwa das Cuvelai-Etosha-Becken.

Die sogenannte Etosha-Pfanne ist eine salzhaltige Lehmpanne. Ihr Name kommt aus der Ovambo-Sprache und bedeutet so viel wie „Großer Weißer Platz“. Diese Pfanne erstreckt sich über 4.760 km² und hat eine maximale Länge von 120 km. Vor etwa zwei bis vier Millionen Jahren entstand aufgrund tektonischer Aktivitäten eine Senke und es bildete sich ein Binnensee. Aufgrund veränderter Flussläufe trocknete der See schließlich aus und hinterließ die heute vorhandene Kalk- und Salzpflanne. Außerhalb dieser Pfanne gibt es zahlreiche artesischen Wasserquellen. Der jährliche Niederschlag beträgt von November bis Februar etwa 410 bis 440 mm.

Das Wasser hat dann allerdings, aufgrund der beschriebenen Salzpflanze, einen höheren Salzgehalt als Meerwasser.



Abbildung 1: Namibia und die Etosha-Salzpflanze. Quelle: Meyers Weltatlas: Die Erde im Großformat

1.2 CUVewaters Wasserentsalzung

Eine Grundwasserentsalzung oder Meerwasserentsalzung wird in der Regel nur durchgeführt, wenn es keine anderen Möglichkeiten der Wassergewinnung gibt. Sie ist mit hohen Investitionskosten verbunden.

Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, liegt die Etosha-Salzpflanze sehr abgelegen und das Grundwasser besitzt einen sehr hohen Salzgehalt. Es ist ungenießbar und deshalb als Trink- und Brauchwasser nicht geeignet. Da diese Gegend abgelegen ist, ist auch keine zuverlässige Stromversorgung vorhanden. Aus diesem Grund wird im Rahmen des CUVewaters Verbundprojektes auf solarbetriebene Entsalzungsanlagen zurückgegriffen, denn der Vorteil Namibias besteht in einer besonders hohen Sonneneinstrahlung von über 6,2 kWh pro Quadratmeter und Tag.

Aufgrund dieser Gegebenheiten wurden in der Modellregion an zwei unterschiedlichen Standorten vier Entsalzungsanlagen implementiert.

Die Umkehrosmoseanlage produziert täglich etwa 3,3 m³ Frischwasser, die Mehrfachverdampfungsanlage etwa 1,4 m³, die mehrstufige Entsalzungsanlage etwa 0,5 m³ und die Membrandestillationsanlage etwa 0,8 m³ Frischwasser. Im Zuge dieser Arbeit wird allerdings nur auf die Membrandestillationsanlage des Fraunhofer ISE eingegangen.

2 Grundlagen

2.1 Thermodynamik

2.1.1 Spezifische Wärmekapazität

Ein homogenes thermodynamisches System kann durch zwei Zustandsgrößen eindeutig beschrieben werden: Die spezifische Enthalpie und die spezifische innere Energie:

$$u = u(v, T)$$

Formel 1 : Spezifische Enthalpie

$$h = h(p, T)$$

Formel 2 : Spezifische innere Energie

Die Funktionen aus Formel 1 und Formel 2 nennt man kalorische Zustandsgleichungen. Deren vollständiges Differenzial bildet man, indem man bei der Differenziation der einen Variablen die andere jeweils konstant hält.

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right) dT + \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right) dp$$

Formel 3 : Differenziation der spezifischen Enthalpie

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right) dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right) dv$$

Formel 4 : Differenziation der spezifischen inneren Energie

In der thermodynamischen Praxis haben jeweils die ersten zwei Differenzialquotienten einen hohen Stellenwert. Sie werden spezifische Wärmekapazität genannt.

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)$$

Formel 5 : Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)$$

Formel 6 : Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck

Die spezifische Wärmekapazität kann gemessen werden, indem man einem System, das keine Aggregatzustandsänderung erfährt, bei konstantem Druck bzw. Volumen Wärme zuführt.

Zur besseren Vorstellbarkeit kann die spezifische Wärmekapazität als die Wärme bezeichnet werden, mit der man die Temperatur von einem Kilogramm eines Stoffes um 1K steigern kann. Bei konstantem Volumen ist c_v und bei konstantem Druck c_p zu verwenden (vgl. Cerbe, G./Wilhelms, G., 2011, S.68f).

Tabelle 1: Wahre spezifische Wärmekapazität c_p einiger fester und flüssiger Stoffe (vgl. Cerbe, G./Wilhelms, G., 2011, S.70)

Fester Stoff	$\frac{kJ}{Kg * K}$	Flüssigkeit	$\frac{kJ}{Kg * K}$
Beton	0,88	Benzol	1,72
Holz	2,1-2,9	Quecksilber	0,138
Eis (bei 0°C)	2,04	Wasser ¹	4,1843

2.1.1.1 Abhängigkeit von Temperatur und Salinität

Die spezifische Wärmekapazität wird in Salzwasser, bei konstantem Druck, merklich reduziert. Dies ist vor allem von der Konzentration des Meerwassers abhängig. Mit steigender Temperatur und steigendem Salzgehalt nimmt die spezifische Wärmekapazität ab, sie ist negativ proportional zu Temperatur und Salinität. Die spezifische Wärmekapazität kann für jede Temperatur zwischen 0 und 180°C und für jede beliebige Salinität zwischen 0 und 180g/kg mit folgenden Gleichungen, nach GRUNBERG, L²., berechnet werden (vgl. Hömig, H.-E., 1978, S.32f).

$$C_p = 2,38836 * 10^{-4} (A + B * T + C * T_w^2 + D * T_w^3)$$

Formel 7 : Berechnung der spezifischen Wärmekapazität

¹ Bei 101,325kPa

² Proc. 3rd Int. Symp. Fresh Water from the Sea, Vol. 1, pp. 31/39 (1970)

$$A = 4206,8 - 6,6197 * S + 1,2288 * 10^{-2} * S^2$$

Formel 8 : Hilfsgleichung A zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität

$$B = -1,1262 + 5,4178 * 10^{-2} * S - 2,2719 * 10^{-4} * S^2$$

Formel 9 : Hilfsgleichung B zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität

$$C = 1,2026 * 10^{-2} - 5,3566 * 10^{-4} * S + 1,8906 * 10^{-6} * S^2$$

Formel 10 : Hilfsgleichung C zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität

$$D = 6,8774 * 10^{-7} + 1,5170 * 10^{-6} * S - 4,4268 * 10^{-9} * S^2$$

Formel 11 : Hilfsgleichung D zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität

Tabelle 2 : Spezifische Wärmekapazität von Salzwasser [kcal/(kg*K)] (vgl. Hömig, H.-E., 1978, S.33)

S g/kg t °C	0	34.3	40	50	60	70	80
20	1.001	0.956	0.949	0.937	0.926	0.915	0.904
30	0.999	0.957	0.950	0.939	0.927	0.917	0.906
40	0.999	0.958	0.951	0.940	0.929	0.918	0.908
50	0.999	0.959	0.952	0.941	0.930	0.920	0.910
60	0.999	0.960	0.953	0.942	0.932	0.921	0.911
70	1.000	0.961	0.955	0.944	0.933	0.922	0.912
80	1.002	0.962	0.956	0.945	0.934	0.924	0.913
90	1.004	0.964	0.958	0.947	0.936	0.925	0.915
100	1.007	0.967	0.960	0.949	0.938	0.927	0.917
110	1.010	0.969	0.963	0.952	0.940	0.930	0.919
120	1.014	0.973	0.966	0.955	0.943	0.932	0.922

In Tabelle 2 sind die wichtigsten Werte der spezifischen Wärmekapazität in Abhängigkeit von Salinität und Temperatur gegeben. Zu beachten ist, dass die Werte in kcal/(kg*K) angegeben sind.

$$1 \text{ kcal} = 4,1868 \text{ kJ}$$

Dementsprechend müssen die Werte mit $4,1868 \frac{\text{kJ}}{\text{kcal}}$ multipliziert werden, um die heutzutage übliche Einheit kJ/(Kg*K) zu erhalten.

2.1.2 Die Dichte

Die Dichte von Wasser wird durch den griechischen Buchstaben ρ angegeben. Sie ist das Verhältnis von Masse und Volumen.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Formel 12 : Die Dichte

2.1.2.1 Abhängigkeit von Temperatur und Salinität

Die Dichte ist prinzipiell von Temperatur und Salzgehalt abhängig. Zu erkennen ist, dass die Dichte mit der Zunahme von Temperatur und Salinität ansteigt. Sie sind im Gegensatz zur spezifischen Wärmekapazität positiv proportional (vgl. Hömig, H.-E., 1978, S.24).

Nach GRUNBERG, L.³ kann über das Tschebycheff-Polynom eine entsprechende Funktion erstellt werden:

$$\rho = 0,5 * a_0 + a_1 * Y + a_2 * (2 * Y^2 - 1) + a_3 * (4 * Y^3 - 3 * Y)$$

Formel 13 : Berechnung der Dichte mit Hilfe des Tschebycheff-Polynoms

$$a_0 = 2,016110 + 0,115313 * \sigma + 0,000326 * (2 * \sigma^2 - 1)$$

Formel 14 : Berechnung der ersten Tschebycheff- Variablen

$$a_1 = -0,0541 + 0,001571 * \sigma - 0,000423 * (2 * \sigma^2 - 1)$$

Formel 15 : Berechnung der zweiten Tschebycheff- Variablen

$$a_2 = -0,006124 + 0,00174 * \sigma - 0,000009 * (2 * \sigma^2 - 1)$$

Formel 16 : Berechnung der dritten Tschebycheff- Variablen

$$a_3 = 0,000346 + 0,000087 * \sigma - 0,000053 * (2 * \sigma^2 - 1)$$

Formel 17 : Berechnung der vierten Tschebycheff- Variablen

$$Y = \frac{2 * Tw - 200}{160}$$

Formel 18 : Temperaturfaktor

$$\sigma = \frac{2 * S - 150}{150}$$

Formel 19 : Salinitätsfaktor

Über Formel 13 wird die Dichte in $\frac{g}{cm^3}$ errechnet.

³ Proc. 3rd Int. Symp. Fresh Water from Sea, Vol. 1, pp. 31/39 (1979)

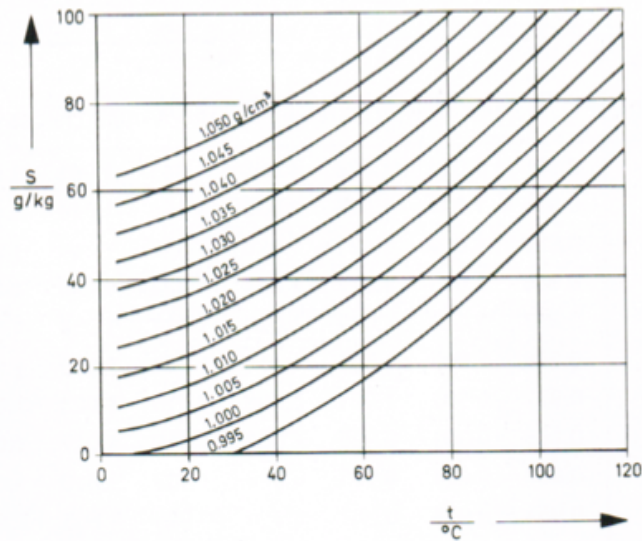


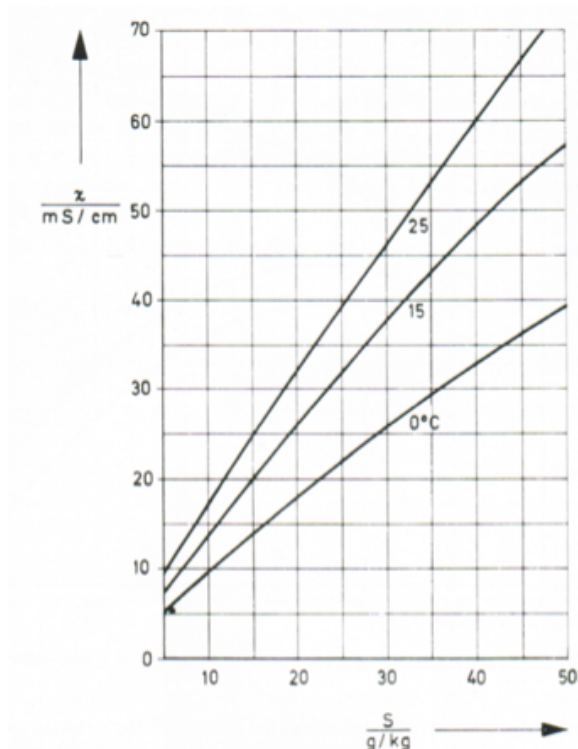
Abbildung 2: Dichte von Salzwasser in Abhängigkeit von der Temperatur (vgl. Hömig, H.-E., 1978, S.26)

Tabelle 3: Dichte von Salzwasser in Abhängigkeit von der Temperatur [g/cm³] (vgl. Hömig, H.-E., 1978, S. 25)

$\frac{S \text{ g/kg}}{t \text{ } ^\circ\text{C}}$	0	34.3	40	50	60	70	80
20	0.998	1.024	1.028	1.036	1.044	1.051	1.059
30	0.995	1.021	1.025	1.033	1.040	1.048	1.055
40	0.992	1.017	1.021	1.029	1.036	1.044	1.051
50	0.988	1.013	1.017	1.024	1.032	1.039	1.047
60	0.983	1.008	1.012	1.020	1.027	1.034	1.042
70	0.978	1.003	1.007	1.014	1.022	1.029	1.036
80	0.972	0.997	1.001	1.008	1.016	1.023	1.031
90	0.965	0.991	0.995	1.002	1.010	1.017	1.024
100	0.958	0.984	0.988	0.995	1.003	1.010	1.018
110	0.951	0.977	0.981	0.988	0.996	1.003	1.011
120	0.943	0.968	0.973	0.981	0.988	0.996	1.003

2.1.3 Elektrische Leitfähigkeit von Salzwasser

Nach der Temperatur ist die elektrische Leitfähigkeit die wohl meist gemessene physikalische Eigenschaft. Mit Hilfe von Messkurven kann die Leitfähigkeit zur Bestimmung des totalen Salzgehalts verwendet werden. Diese Methode ist viel einfacher als es wäre, das Wasser zu verdampfen und den Salzurückstand zu messen.



In Abbildung 3 kann man die Abhängigkeit des Salzgehalts von Leitfähigkeit und Temperatur sehen. Im Speziellen kann man den Umrechnungsfaktor von mS/cm und g/kg ablesen.

Abbildung 3 : Elektrische Leitfähigkeit von Salzwasser (vgl. Hömig, H.-E., 1978, S. 38)

2.1.4 Wärmestrom und Wärmeübertragung

Will man Wärme von einem wärmeren einem kühleren Fluid übertragen, um dieses zu erwärmen, benötigt man einen Wärmeübertrager. Dafür gibt es drei Ausführungsarten:

Rekuperatoren. Hier sind zwei getrennte Systeme vorhanden. Diese sind durch eine wärmedurchlässige Grenze getrennt. In jedem System strömt ein Fluid und durch die wärmedurchlässige Grenze wird Wärme übertragen, z.B. im Dampferzeuger.

Regeneratoren. Hier ist nur ein System vorhanden. Im zeitlichen Wechsel wird das System durch das heiße Fluid erwärmt und die gespeicherte Energie an das kältere Fluid abgegeben, z.B. beim Winderhitzer des Hochofens.

Mischwärmeübertrager. Hier wird das kalte unmittelbar vom warmen Fluid berührt und Wärme ausgetauscht, z.B. im Kühlturm (vgl. Cerbe, G./Wilhelms, G., 2011, S.390f).

Ein Rekuperator wird von zwei Seiten und demselben Fluid mit unterschiedlicher Temperatur durchströmt. Ist die Strömung

reibungsfrei, so bleibt der Druck konstant, dies ist notwendig, da bei steigendem Druck die Leitungen platzen können.

Es gibt unterschiedliche Bauformen und je nach Form strömen die Fluide im Gegen-, Gleich- oder Kreuzstrom (vgl. Abbildung 4 und Abbildung 5). Während des Durchströmens des Wärmeübertragers ändern sich die Temperaturen der Fluide. Sollte es zu einer Phasenänderung eines Stoffes kommen, so wird dessen Temperatur für die Dauer der Phasenänderung als konstant angenommen. Über den Verlauf der Wärmeübertragungsfläche ändert sich auch die Temperaturdifferenz (vgl. Cerbe, G./Wilhelms, G., 2011, S.391f).

$$\Delta t = t_a - t_b \quad t_a > t_b$$

Formel 20 : Temperaturdifferenz zwischen Fluid a und Fluid b

Daher setzen wir den sehr kleinen Wärmestrom $d\dot{Q}$ an einer beliebigen Stelle der sehr kleinen Teilwärmeübertragungsfläche dA an (vgl. Cerbe, G./Wilhelms, G., 2011, S.391f).

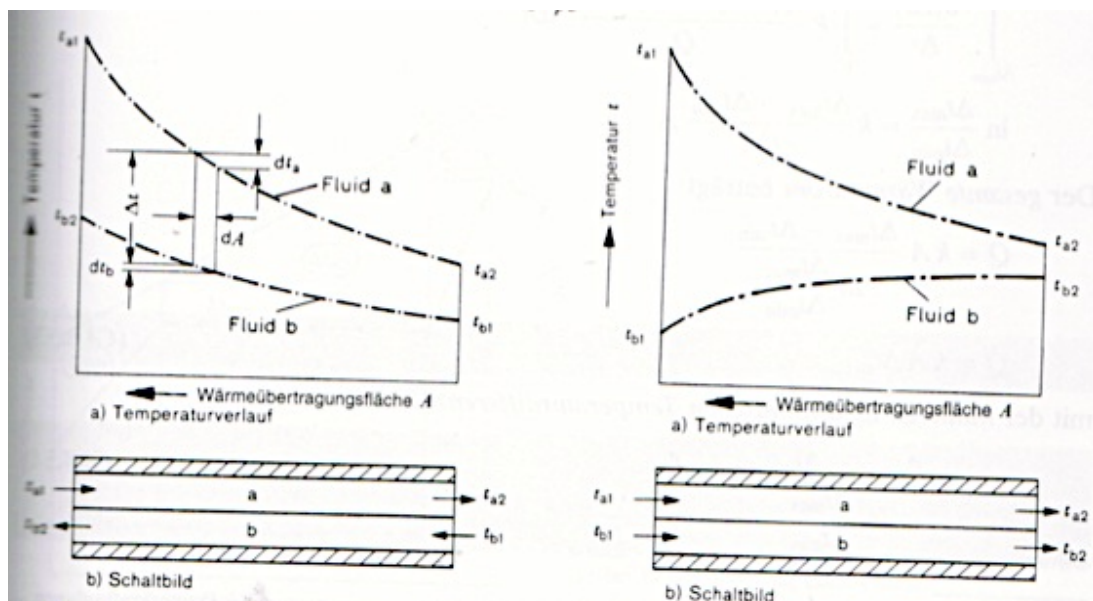


Abbildung 4: Schaltbilder. Links Gegenstromwärmeübertrager, rechts Gleichstromwärmeübertrager (vgl. Cerbe, G./Wilhelms, G., 2011, S.391).

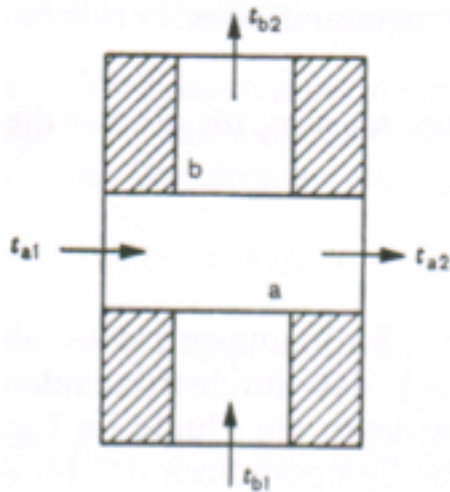


Abbildung 5: Schaltbild eines Kreuzstromwärmeübertragers (vgl. Cerbe, G./Wilhelms, G., 2011, S.392)

$$d\dot{Q} = k \Delta t \, dA$$

Formel 21 : Ansatz Wärmestrom

Zu beachten ist, dass der Wärmestrom $d\dot{Q}$ von Fluid a an Fluid b abgegeben wird, da die Temperatur von Fluid a größer ist als die Temperatur von Fluid b. Fluid a kühlt also um dt_a ab. Fluid b erwärmt sich um dt_b , von ihm wird, bei Vernachlässigung von Wärmeverlusten, folgender Wärmestrom aufgenommen (vgl. Cerbe, G./Wilhelms, G., 2011, S.391f):

$$d\dot{Q} = |\dot{m}(a) * cp(a) * dt(a)| = \dot{m}(b) * cp(b) * dt(b)$$

Formel 22 : Wärmestrom Differenzialgleichung

Durch Integration von Formel 22 folgt:

$$\dot{Q} = \dot{m} * cp * \Delta T \quad [\text{kW}]$$

Formel 23 : Wärmestrom kW

2.1.5 Massenstrom

Um den im vorherigen Abschnitt ermittelten Wärmestrom berechnen zu können, fehlt noch der Massenstrom. Dieser hat die Einheit kg/s und kann aus dem Volumenstrom und der Dichte berechnet werden.

$$\dot{m} = Q * \rho \quad [\text{kg/s}]$$

Formel 24 : Berechnung des Massenstroms

Bekanntlich gibt der Volumenstrom Q die Menge eines flüssigen Mediums an, welches pro Sekunde einen bestimmten Abschnitt passiert. Multipliziert mit der Dichte des entsprechenden Mediums ergibt sich der Massenstrom.

2.2 Solarstrahlung

Für eine optimale Nutzung und das Funktionieren der Entsalzungsanlagen ist das Sonnenlicht und dessen Einstrahlung erforderlich. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel etwas genauer auf wichtige Teilaspekte der Solarstrahlung eingegangen.

Die Sonne ist die Strahlungsquelle der Erde, sie besitzt einen Durchmesser von etwa $1,4 * 10^6$ km. Der Abstand zur Erde beträgt $1,5 * 10^8$ km. Bei Berechnungen, die den Erdbestand mit einbeziehen, sollte ein Fehler von $\pm 2\%$ berücksichtigt werden, der auf jahreszeitliche Schwankungen zurückzuführen ist.

Nun wird zwischen terrestrischer und extraterrestrischer Strahlung differenziert. Extraterrestrische Strahlung betrifft alle Strahlen, welche am Rand der Erdatmosphäre ankommen.

Bekanntermaßen wird die Strahlung in der Erdatmosphäre auf verschiedene Arten beeinflusst. Die Solarstrahlung, welche an der Erdoberfläche gemessen wird, ist die terrestrische Strahlung (vgl. Herwig, H./Moschallski, A., 2009, S.185 f.).

2.2.1 Schwarzkörper

Emittiert ein Körper Strahlung in einen Halbraum, so ist dieser Energiestrom die Strahlungsleistung. Der schwarze Körper erreicht die maximal mögliche Ausstrahlung. Formel 25 beschreibt die Stefan-Boltzmann-Gleichung. Bei der Ausstrahlung grauer Körper muss man einen Wirkungsgrad berücksichtigen; dieser besteht normalerweise aus einem Emissionskoeffizienten ε . Dieser Emissionskoeffizient bezieht sich allerdings nicht nur auf die vorhandene Emission, sondern auch auf Absorption und Transmission. Um diesen Koeffizienten zu berechnen, können alle Verluste multipliziert und als

Emissionskoeffizient angegeben werden (vgl. Cerbe, G./Wilhelms, G, 2011, S.380ff).

$$E(T) = \sigma * T^4 \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Formel 25 : Stefan-Boltzmann-Gleichung, spezifische Ausstrahlung für schwarze Körper.

$$E(T) = \varepsilon * \sigma * T^4 \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Formel 26 : Stefan-Boltzmann-Gleichung für graue Körper

Tabelle 4 : Emissionskoeffizient senkrecht zur Fläche ε_n für einige Körper⁴ (Cerbe, G./Wilhelms, G, 2011, S.383)

Oberfläche	Temperatur in °C	ε_n
Kupfer, poliert	20	0,030
Aluminium, walzblank	170	0,039
Eisen, blank, geschmiegelt	20	0,24
Eisen, stark verrostet	19	0,685
Heizkörperlack	100	0,925
Schwarzer Lack, matt	80	0,970
Ziegelstein, Mörtel, Putz	20	0,93
Holz (Buche)	70	0,935
Eis, glatt; Wasser	0	0,966

Anhand von Tabelle 4 kann man sehen, dass die Strahlungsaufnahme abhängig vom Material abnimmt. Bei einem idealen Schwarzkörper ist somit der Emissionskoeffizient 1. Möchte man mit Hilfe von solarthermischen Kollektoren Sonnenstrahlung einfangen und diese in Energie umwandeln, so ist sicherzustellen, dass die Oberfläche des Solarmoduls weitestgehend der eines Schwarzkörpers entspricht.

2.2.2 Extraterrestrische Strahlung

Die Erde wird parallel mit einer Solarkonstanten $E_0 = (1367 \pm 1,6) \frac{W}{m^2}$ bestrahlt. Vereinfacht kann die Sonne als Schwarzkörper betrachtet werden. Abbildung 6 zeigt die spektrale extraterrestrische Strahlung

⁴ Nach Messungen von E. Schmidt und E. Eckert

der Sonne sowie die Strahlungsverteilung eines Schwarzkörpers. Da nach Abbildung 6 Solarstrahlung und Schwarzkörperstrahlung konform sind, kann die Temperatur der Sonne mit der Temperatur eines Schwarzkörpers, $T_s = 5777\text{K}$, gleichgesetzt werden. Es lässt sich außerdem erkennen, dass das Energiemaximum der extraterrestrischen Strahlung etwa bei $\lambda \approx 0,5\mu\text{m}$ liegt. Bei terrestrischen Strahlungsquellen liegt dieses Maximum allerdings etwa bei $\lambda \approx 10\mu\text{m}$ (vgl. Herwig, H./Moschallski, A., 2009, S.186 f.).

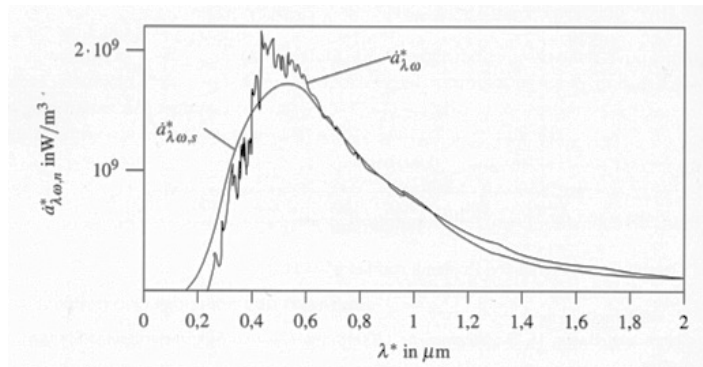


Abbildung 6: Spezifische spektrale Einstrahlungsdichte am Rand der Erdatmosphäre der Solarstrahlung und einer äquivalenten Schwarzkörperstrahlung, jeweils senkrecht zur Einstrahlungsfläche (Herwig, H./Moschallski, A., 2009, S.186)

Das *Planksche* Strahlungsgesetz beschreibt die spektrale Energiedichte eines schwarzen Strahlers in Abhängigkeit der Frequenz ν .

$$u_\nu(\nu, T) d\nu = \frac{8\pi h}{c^3} * \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu$$

Formel 27 : Spektrale Energiedichte nach dem Plankschen Strahlungsgesetz in Abhängigkeit der Frequenz

Durch Integration über alle Frequenzen, Multiplikation mit dem Faktor $\frac{c^3}{4}$, der auf die Art der Abstrahlung von der Sonnenoberfläche zurückzuführen ist, mit Hilfe der Stefan-Boltzmann-Gleichung (Formel 25) und bezogen auf die differenziellen Wellenlängenintervalle und in Abhängigkeit von λ ergibt sich die spektrale Energiedichte in Abhängigkeit der Wellenlänge (vgl. Wagemann, H.-G./Eschrich, H., 2010, S.9).

$$u_\lambda(\lambda, T) d\lambda = \frac{8\pi h c^5}{\lambda^5} * \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda$$

Formel 28 : Spektrale Energiedichte in Abhängigkeit der Wellenlänge nach Planck.

2.2.3 Terrestrische Strahlung

Durch das Passieren der Erdatmosphäre wird die Strahlung verringert. Dies kann durch unterschiedliche Effekte entstehen, welche nachfolgend erläutert werden (vgl. Herwig, H./Moschallski, A., 2009, S.187f).

Ein Teil der Strahlung wird die Erdoberfläche erreichen, allerdings wird er abgeschwächt. Der Grund dieser Abschwächung und deren Faktoren werden im kommenden Abschnitt beschrieben. Der Teil, welcher die Erdoberfläche sofort erreicht, wird als Transmission bzw. direkte Strahlung bezeichnet (vgl. Herwig, H./Moschallski, A., 2009, S.187f).

Rayleigh-Streuung. Ein Teil der Strahlung wird die Erdoberfläche als diffuse Strahlung erreichen, der andere Teil wird zurück in den Weltraum geschleudert.

Reflexion. Beim Versuch, in die Erdatmosphäre einzutreten, wird ein Teil der Strahlung von dieser in den Weltraum reflektiert. Ein anderer Teil wird die Erdoberfläche als diffuse Strahlung erreichen.

Absorption. Hierdurch entsteht die *atmosphärische Gegenstrahlung*. Ein Teil der Strahlung wird in der Erdatmosphäre absorbiert und dort als innere Energie gespeichert. Dies ist der Teil, welcher zur langwelligen Strahlung der Atmosphäre beiträgt (vgl. Herwig, H./Moschallski, A., 2009, S.187f).

Alle Strahlungen, welche die Erdoberfläche erreichen, sind als kurzwellige Strahlungen zu bezeichnen und als Globalstrahlung zusammenzufassen. Die Globalstrahlung setzt sich aus Himmelsstrahlung und dem zu Beginn durchgelassenen Anteil zusammen. Diese Himmelsstrahlung besteht aus den diffusen Anteilen der zuvor erläuterten Effekte (vgl. Herwig, H./Moschallski, A., 2009, S.187f).

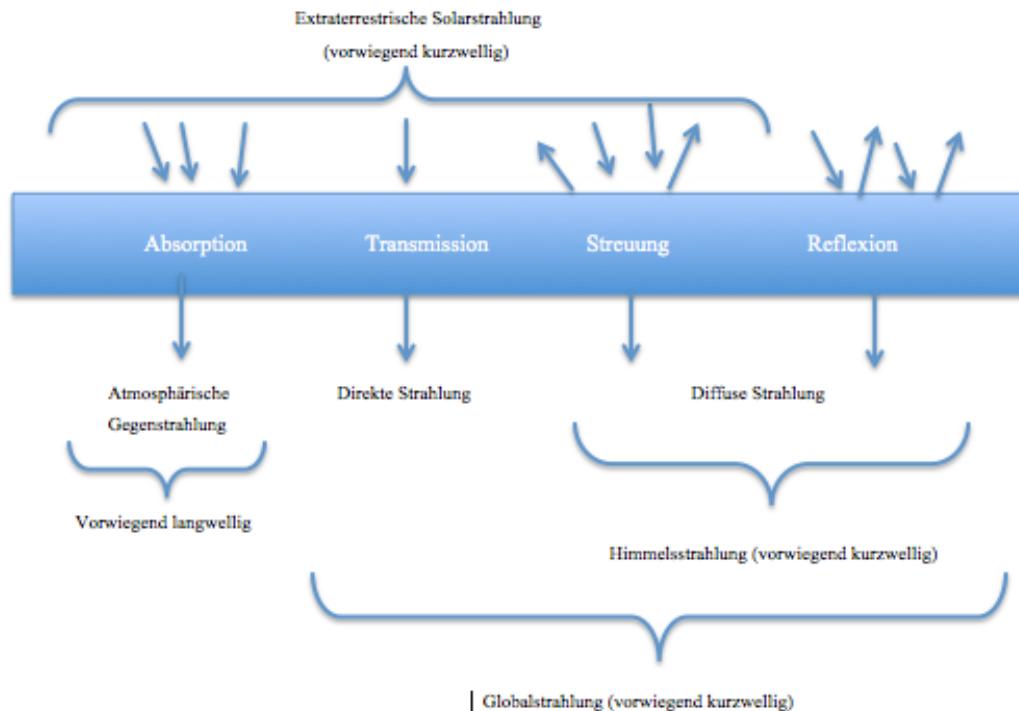


Abbildung 7 : Einfluss der Erdatmosphäre auf die extraterrestrische Solarstrahlung (Vgl. Herwig, H./Moschallski, A., 2009, S.188)

2.2.4 Die Strahlungsleistung der Sonne

Wie bereits beschrieben wurde, kann die Erde als schwarzer Strahler angesehen werden. Durch Rundung kommt man nun auf eine Sonnentemperatur von $T_{so} = 5800K$. Des Weiteren kann festgehalten werden, dass sich die Sonne parallel zur Erde befindet und deren Temperaturen sich über lange Sicht nicht ändern. Sie stehen also in einem Strahlungsgleichgewicht. Man kann die der Erde zugeführte Strahlungsleistung mit Hilfe des *Stefan-Boltzmann-Gesetzes* berechnen (vgl. Wagemann, H.-G./Eschrich, H., 2010, S.7).

$$P_s = \pi * R_e^2 * f * \sigma * T^4$$

Formel 29 : Stefan-Boltzmann-Gesetz

$$\text{mit } f = \left(\frac{R_e}{R_{se}} \right)^2 = 21,7 * 10^{-6}$$

Formel 30 : Verhältnis Erd- zu Sonnenradius

$$\text{und } \sigma = 5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4}$$

Formel 31 : Konstante Sigma des Stefan-Boltzmann-Gesetzes

Hierbei beträgt die Entfernung der Mittelpunkte von Sonne und Erde $R_{se} = 1,496 \cdot 10^8 \text{ km}$. Dies ist eine Approximation der mittleren Entfernung der elliptischen Erdbahn, aufgrund der geringen Exzentrizität von $\varepsilon = 0,017$ kann die Bahn an einen Kreis angenähert werden.

Der Sonnenradius, R_s , beträgt $6,96 \cdot 10^5 \text{ km}$, der Erdradius R_e hingegen $6,38 \cdot 10^3 \text{ km}$.

Ein weiterer wichtiger Faktor dieser Formel ist der Abschwächungsfaktor bzw. Verdünnungskoeffizient f und die Stefan-Boltzmann-Konstante. Berechnet man hieraus die auf die Erde einfallende Strahlungsleistung, so erhält man:

$$P_s = 1,78 \cdot 10^{17} \text{ W.}$$

Multipliziert man diesen Wert mit $8760 \frac{\text{h}}{\text{a}}$, so erhält man eine jährliche Strahlungsenergie von $1,56 \cdot 10^{18} \text{ kWh}$. Der weltweite Primärenergiebedarf betrug 2007 $142,3 \cdot 10^{14} \text{ kWh}$ (vgl. Wagemann, H.-G./Eschrich, H., 2010, S.7f).

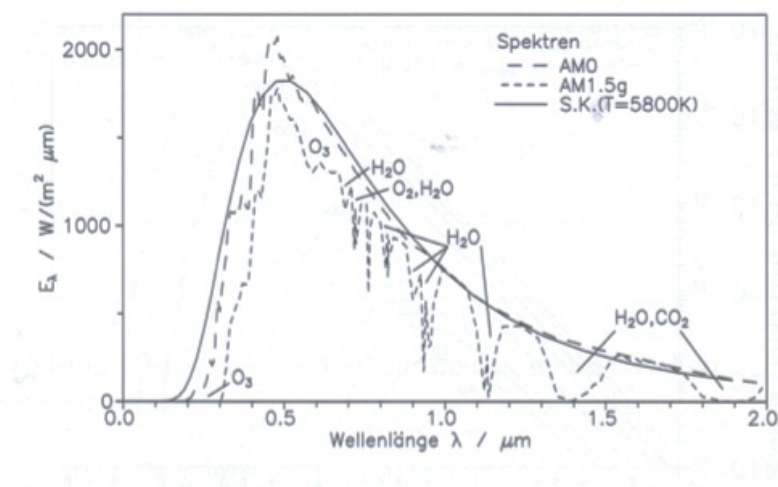


Abbildung 8 : Spektrale Strahlungsdichte der Sonne $E(\lambda)\lambda$ außerhalb und innerhalb der Atmosphäre im Vergleich zur Schwarz-Körper-Strahlung (Wagemann, H.-G./Eschrich, H., 2010, S.12).

In Abbildung 8 wird die spektrale Einstrahlungsdichte außerhalb und innerhalb der Erdatmosphäre mit der eines Schwarzkörpers verglichen. Durch Strahlungsabsorption verschiedener Molekülgruppen werden Einbrüche verursacht.

Innerhalb der Atmosphäre sind das vor allem Wasserdampf (H_2O), Ozon (O_3), Sauerstoff (O_2) und Kohlendioxid (CO_2). Die in der Erdatmosphäre befindliche Luft sowie die vorhandenen Aerosole

schwächen das Sonnenlicht bzw. deren spektrale Verteilung stark durch Absorption und Streuung ab. Die diffuse Strahlung nimmt zu und die direkte Strahlung nimmt ab.

2.2.5 Berechnung der Globalstrahlung

Misst man die Globalstrahlung I_{global} an einem bestimmten Punkt, am Besten in unmittelbarer Umgebung eines Solarmoduls, kann man den entstehenden Wärmestrom berechnen. Eine Strahlung, in diesem Fall die Globalstrahlung, hat immer die Einheit W/m^2 . Um nun den Wärmestrom an diesem Punkt zu berechnen, muss man die Strahlung mit der Fläche des Solarmoduls multiplizieren.

$$\dot{Q} = I * A \quad [\text{W}]$$

Formel 32 : Wärmestrom der Sonne

Um die Einheitlichkeit innerhalb dieser Arbeit zu gewährleisten, wird der Wärmestrom in kWh umgerechnet:

$$\dot{Q} = I * A * \frac{\Delta t}{3600 * 1000} \quad [\text{kWh}]$$

Formel 33 : Sonnenenergie

Die Sonnenenergie ist also die Energie, welche auf das Solarmodul auftrifft. Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades der solarthermischen Kollektoren kann man nun den Wärmestrom innerhalb des Kollektorkreislaufs berechnen.

2.3 Sonnenkollektoren

Im Allgemeinen dienen Sonnenkollektoren zur Umwandlung von Sonnenstrahlung in Wärme und deren Übergabe an ein Wärmeträgermedium (Wasser, Frostschutzmittel, Luft usw.). Anschließend kann die Sonnenwärme zur Warmwasserbereitung, Heizungsunterstützung oder zur Schwimmbaderwärmung genutzt werden.

Kernstück eines jeden Kollektors ist der Absorber. Dieser besteht in der Regel aus mehreren schmalen Metallstreifen. Das Wärmeträgermedium wird durch ein mit dem Absorberstreifen verbundenes Wärmeträgerrohr geleitet.

Ein Plattenabsorber besitzt zwei zusammengeschweißte Platten, zwischen denen das Wärmeträgermedium strömen kann. Typische Absorbermaterialien sind Kupfer und Aluminium.

Ein Speicherkollektor besitzt die Funktion des Kollektors und des Speichers in einem Gerät. Diese Anlagen benötigen keine Umwälzpumpen und Regeleinrichtungen, da das Trinkwasser direkt im Kollektor erwärmt und gespeichert wird (vgl. <http://www.solarserver.de/>).

2.3.1 Absorberoberflächen

Absorber sind meistens schwarz, schließlich soll ihre Leistung mit der eines Schwarzkörpers konvergieren. Ein solcher hat schließlich einen Absorptionsgrad von 100%. Dieser Absorptionsgrad gibt an, wieviel der einfallenden kurzwelligen Sonnenstrahlung, der Globalstrahlung, aufgenommen und nicht reflektiert wird. Dieser Absorber erwärmt sich durch die Sonnenstrahlung und erreicht eine höhere Temperatur als die Umgebung. Da nun ein Temperaturgefälle herrscht und bekanntlich immer Wärme von der heißeren Quelle an die kühlere abgegeben wird, gibt der Absorber einen beachtlichen Teil der aufgenommenen Sonnenenergie in Form von langwelliger Wärmestrahlung wieder ab. Dieser Anteil wird durch den Emissionsgrad angegeben.

Um diese Verluste zu minimieren, sind die hocheffizienten Absorberoberflächen mit einer selektiven Beschichtung versehen. Diese ermöglicht die Aufnahme eines hohen Anteils der Sonnenstrahlung und deren Umwandlung in Wärme. Gleichzeitig vermindert sie die Emission von Wärmestrahlung. Die üblichen Beschichtungen verfügen in der Regel über Absorptionsgrade, die über 90% liegen. Solarlacke, die mechanisch aufgetragen werden, sind nicht oder nur wenig selektiv, da sie über einen hohen Emissionsgrad verfügen. Bei Schwarzchrom, Schwarznickel und mit Nickel pigmentiertem Aluminiumoxid handelt es sich um galvanisch aufgebrachte, selektive Schichten. Relativ neu ist eine Titan-Nitrid-Oxid-Schicht, die in einem Vakuum-Verfahren aufgedampft wird. Sie zeichnet sich nicht nur durch einen sehr niedrigen Emissionsgrad aus, sondern auch durch ein emissionsfreies, weniger aufwendiges Produktionsverfahren (vgl. <http://www.solarserver.de/>).

2.3.2 Der Flachkollektor

Flachkollektoren bestehen aus den Bauteilen Absorber, transparente Abdeckung, Gehäuse und Wärmedämmung. Als transparente Abdeckung kommt meist eisenarmes Solarsicherheitsglas zum Einsatz, das sich durch einen hohen Transmissionsgrad für den kurzwelligen

Spektralbereich auszeichnet. Aufgrund des Treibhauseffektes gelangt gleichzeitig nur wenig Wärmeabstrahlung vom Absorber durch die Glasabdeckung hindurch.

Weiter verhindert die transparente Abdeckung den Wärmeentzug vom Absorber durch vorbeistreichende kältere Luft (Konvektion). Der Absorber wird also durch die transparente Abdeckung und durch das Gehäuse vor Witterungseinflüssen geschützt. Das Gehäuse besteht typischerweise aus Aluminium und verzinktem Stahlblech, selten wird auch glasverstärkter Kunststoff verwendet.

Durch die Wärmedämmung auf der Rückseite des Absorbers und an den Seitenwänden werden Wärmeverluste durch Wärmeleitung vermindert. Als Dämmmaterialien werden hauptsächlich Polyurethan-Schaum und Mineralwolle bevorzugt, in seltenen Fällen auch Mineralfaser-Dämmstoffe wie Glaswolle, Steinwolle, Glasfaser oder Fiberglas.

Flachkollektoren sind hervorzuheben, weil sie sich durch ein gutes Preis-Leistungs-Verhältnis und zahlreiche Montagemöglichkeiten auszeichnen (Indach, Aufdach, Freiaufstellung).

Um Konvektionsverluste im Kollektorkasten zu reduzieren, besteht die Möglichkeit, die im Kollektor vorhandene Luft aus dem Inneren herauszupumpen und ein Vakuum zu erzeugen. Diese Kollektoren nennt man Vakuum-Flachkollektoren. Sie müssen allerdings alle ein bis drei Jahre neu evakuiert werden (vgl. <http://www.solarserver.de/>).

2.3.3 Der Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad ist definiert als Quotient aus nutzbarer thermischer Energie und auftretender Sonnenenergie. Neben Wärmeverlusten treten optische Verluste auf. Der optische Wirkungsgrad beziehungsweise Konversionsfaktor η_0 gibt an, wie viel Prozent der Sonnenstrahlung durch die transparente Abdeckung des Kollektors gelangt und vom Absorber aufgenommen wird. Er ergibt sich aus dem Produkt aus Transmissionsgrad der Abdeckung und Absorptionsgrad des Absorbers. Nun sind noch die Wärmeverluste zu berücksichtigen. Diese werden durch den thermischen Verlustfaktor oder k-Wert angegeben. Er gibt den Energieverlust in W pro m² Kollektorfläche und °C Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Umgebung an. Je höher diese Temperaturdifferenz ist, desto höher sind auch die Wärmeverluste. Ab einer bestimmten Temperaturdifferenz sind die Wärmeverluste gleich dem Energieertrag des Kollektors, sodass dieser keine Energie mehr an den Kollektorkreislauf liefert (vgl. <http://www.solarserver.de/>).

Ein guter Kollektor muss also über einen hohen Konversionsfaktor und einen niedrigen k-Wert verfügen.

Kollektortyp	Konversionsfaktor	Thermischer Verlustfaktor	Temperaturbereich
	[-]	$[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}]$	[°C]
Absorber (unabgedeckt)	0,82 – 0,97	10 – 30	Bis 40
Flachkollektor	0,66 – 0,83	2,9 – 5,3	20 – 80
Vakuum-Flachkollektor	0,81 – 0,83	2,6 – 4,3	20 – 120
Vakuum-Röhrenkollektor	0,62 – 0,84	0,7 – 2,0	50 – 120
Speicherkollektor	Etwa 0,55	Etwa 2,4	20 – 70
Luftkollektor	0,75 – 0,90	8 – 30	20 – 50

Tabelle 5 : Wirkungsgrade verschiedener Kollektoren (vgl. www.solarserver.de/)

2.4 Wasserentsalzung

2.4.1 Hintergrund

Wasser ist eines der wichtigsten Güter, eine Ressource, ohne die ein Überleben nicht möglich wäre. Es ist zwar ein fast unendliches Volumen an Wasser auf diesem Planeten vorhanden, davon ist allerdings nur ein Bruchteil genießbar.

Weltweit haben 1,2 Milliarden Menschen keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser. Jährlich werden 2,2 Millionen Menschen Opfer des Mangels an adäquatem Trinkwasser. Es sterben täglich 6.000 Menschen durch unreines Trinkwasser. Aus diesen Gründen ist es eine wichtige Aufgabe der heutigen und kommender Generationen, nachhaltig mit den vorhandenen Ressourcen umzugehen, insbesondere mit der Ressource Wasser (vgl. Cornel, P./Wagner, M., 2011, Kapitel 1).

Da Entsalzungsanlagen einen sehr hohen Energiebedarf haben, werden sie oft mit solarthermischen Kollektoren kombiniert. So hat man eine autonome Anlage, welche nur von der Sonneneinstrahlung abhängig ist. Außerdem werden Luftverschmutzung und Emissionen durch den Nichtgebrauch von fossilen Brennstoffen reduziert. Die Entsalzungsindustrie weist dabei besonders in ariden Gebieten eine stark wachsende Tendenz auf (vgl. Rizutti, L et. al., 2007, S. 1).

In Singapur gibt es bspw. keine Süßwasserquelle, dennoch werden täglich 14 Millionen Kubikmeter Trinkwasser zur Verfügung gestellt. Zu 10 Prozent stammt dieses Trinkwasser aus der Meerwasserentsalzung, dies sind 1,4 Millionen Kubikmeter Trinkwasser pro Tag (vgl. <http://gruenswarz.blog.de>).

Im kommenden Abschnitt werden verschiedene Methoden zur solarthermischen Wasserentsalzung beschrieben.

2.4.2 Möglichkeiten der Entsalzung

Heutige Entsalzungsanlagen benötigen sehr viel Energie. Entweder verwendet man elektrischen Strom, um Hochdruckpumpen für die Umkehrosmoseanlage zu betreiben, oder man benötigt Pumpen, um das Wärmeträgermedium voranzutreiben.

Thermische Entsalzungsanlagen benötigen ebenfalls eine große Menge an Energie, z.B. um den Dampfdruck bei der Mehrfachverdampfungsanlage zu erzeugen.

Die Umkehrosmoseanlage benötigt etwa $5 \frac{kWh}{m^3}$ und die Mehrfachverdampfungsanlage etwa $4 \frac{kWh}{m^3}$ (vgl. Rizutti, L. et. al., 2007, S.2f).

Zur Trennung des Salzes vom Wasser im Entsalzungsprozess existieren viele verschiedene Möglichkeiten. Allen ist gemeinsam, dass der

erforderliche Prozess prinzipiell nicht spontan abläuft, sondern Energie benötigt.

Die ersten Entsalzungsanlagen basierten auf dem Prinzip der Verdampfung: Salzwasser wird erhitzt, verdampft, das Salz bleibt zurück und das Kondensat wird aufgefangen. Diese Verdampfung wurde mit Sonnenenergie erzeugt. Diese Methode wird heute noch bei thermischen Entsalzungsprozessen verwendet.

Allerdings wurden mittlerweile moderne polymere Membranen entwickelt, welche ein selektives Passieren von Wasser erlauben. Dies sind vor allem semipermeable- oder Ionenaustausch-Membrane. Diese Selektion der Membranen wird anhand dreier Kriterien festgelegt:

1. Was wird extrahiert?
2. Welcher Separierungsprozess soll verwendet werden?
3. Welche Energieform wird verwendet?

Bei Punkt eins ist zu entscheiden, ob das Wasser oder das Salz aus dem ankommenden Volumenstrom extrahiert werden soll. Verfahren, bei denen Salz extrahiert wird, sind zum Beispiel der Ionenaustausch oder die Elektrodialyse. Hier wird eine Spannung angelegt und die ionisierten Spannungsträger der Salze werden durch eine Ionenaustausch-Membran getrennt. Meistens werden jedoch Verfahren verwendet, welche das Wasser extrahieren, da diese effizienter sind. Bei der Wasserextraktion ist zwischen Verfahren mit und ohne Phasenwechsel zu unterscheiden. Die Verfahren mit Phasenwechsel sind die Destillation und das Gefrierverfahren. Diese Prozesse benötigen allerdings aufgrund der hohen Siedetemperatur von Wasser sehr viel Energie. Bei diesen Verfahren wird im Allgemeinen Wasser verdampft und das Kondensat aufgefangen.

Bei Verfahren ohne Phasenwechsel wird meistens auf die Umkehrosmose zurückgegriffen. Hier ist es, aufgrund des osmotischen Drucks, nur dem Wasser möglich, durch die semi-permeable Membran zu diffundieren (vgl. Cipollina, A. et. al., 2009, S.5ff).

Diese Verfahren können außerdem hinsichtlich ihres Bedarfs unterschiedlicher Energieformen unterteilt werden:

Die mechanische Energie, hierzu wird die Umkehrosmose sowie die mechanische Brüdenkompression gezählt.

Die thermische Energie, hierzu gehören die Verfahren ohne Phasenwechsel, ausgenommen die mechanische Brüdenkompression.

Die elektrische Energie, hierzu wird nur die Elektrodialyse gezählt. (vgl. Cipollina, A. et. al., 2009, S.8ff

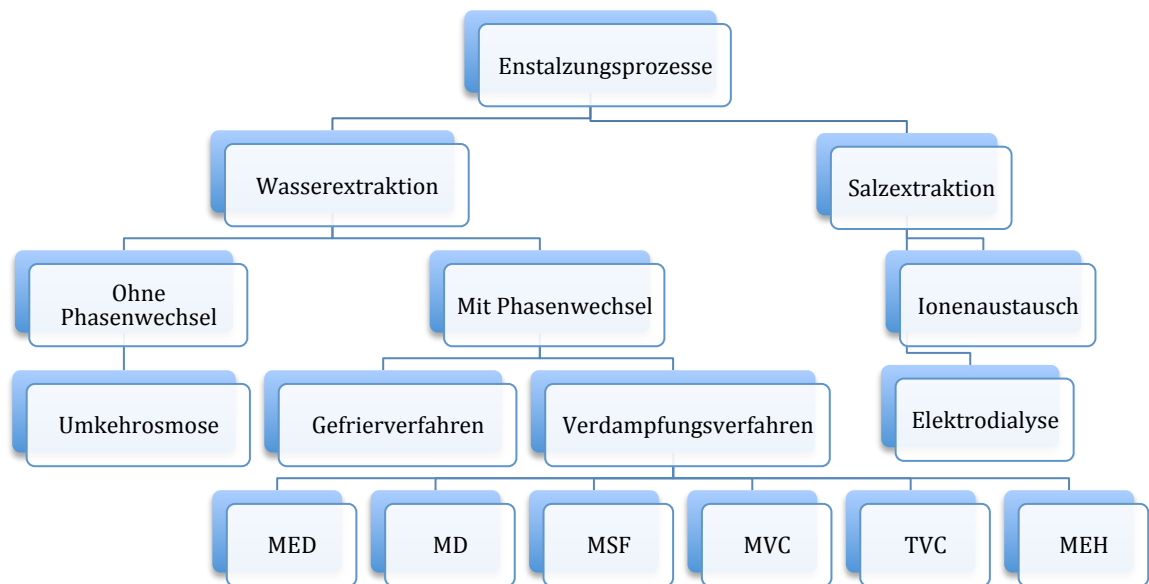


Abbildung 9: Klassifizierung der Entsalzungstechnologien (vgl. Cipollina, A. et. al., 2009, S.7).

2.4.2.1 Umkehrosmose

Bei einer Umkehrosmose sind zwei Kammern durch eine semipermeable Membran voneinander getrennt. In einer Kammer befindet sich die Sole und in der anderen reines Wasser. Aufgrund eines Konzentrationsgefälles zwischen den zwei Kammern kommt es zur Osmose. Um dieses Konzentrationsgefälle auszugleichen, diffundiert Wasser von der Kammer des Permeats in die Kammer der Sole, bis sich ein Gleichgewicht einstellt. Dieser Prozess läuft aufgrund des osmotischen Drucks ab. Der osmotische Druck steigt mit Zunahme des Konzentrationsgefälles.

Der Prozess der Osmose läuft hier jedoch umgekehrt, weshalb er Umkehrosmose genannt wird. Der Wasserfluss wird durch einen angelegten Druck in Richtung des Permeats geleitet. Hierfür muss der Druck auf die Sole höher sein als der osmotische Druck. Mit der Dauer steigt auch das Konzentrationsgefälle und somit der osmotische Druck. Der Energiebedarf steigt also mit zunehmender Konzentration des Salzgehalts (vgl. Sturm, M.).

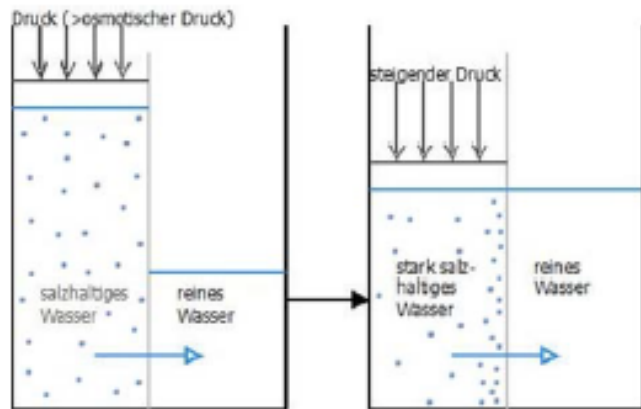
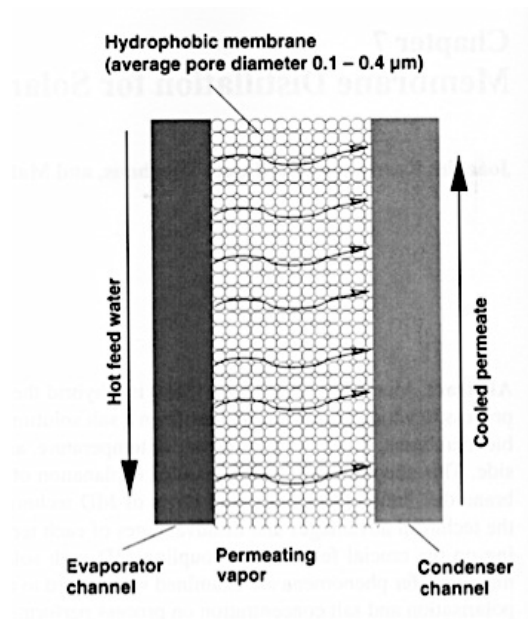


Abbildung 10 : Funktionsweise der Umkehrosmose (vgl. Sturm, M.)

2.4.2.2 Membrandestillation



Wie bereits beschrieben wurde, ist die Membrandestillation ein thermisches Separationsverfahren. Thermische Energie wird genutzt, um einen Phasenwechsel von Wasser zu erzeugen. Flüssiges, salzhaltiges Wasser verwandelt sich in gasförmigen Wasserdampf. Dieser Wasserdampf kann durch eine hydrophobe, mikroporöse Membran diffundieren.

Abbildung 11 : Prinzip einer Direktkontakt-Membrandestillation (vgl. Cipollina, A. et. al., 2009, S.166)

Flüssiges Wasser kann die polymeren Membranmaterialien nicht passieren, dies ist auf die Kapillardepression zurückzuführen. Die Kapillardepression entsteht durch das Entgegenwirken der Kohäsions- und Adhäsionskräfte.

Die Kohäsionskräfte sind die Bindekräfte der flüssigen Moleküle, welche zur Oberflächenspannung führen. Die Adhäsionskräfte hingegen sind die Bindekräfte zwischen flüssigen Molekülen und Membran. Zu beachten ist, dass die hydrostatische Druckkraft der Wassersäule auf beiden Seiten der Membran kleiner sein muss als die Druckkraft der Membran (vgl. Cipollina, A. et. al., 2009, S.165ff).

Die aktive Kraft in einem solchen Prozess ist die Dampfdruckdifferenz zwischen den zwei Seiten der Membran. Bei einer Direktkontakt-Membrandestillationsanlage entsteht die Dampfdruckdifferenz durch ein Temperaturgefälle. Wie in Abbildung 11 zu erkennen ist, gibt es links der Membran einen Evaporator channel (Verdampfungskanal). Durch diesen fließt das erwärmte Salzwasser. Auf der rechten Seite der Membran ist ein Condenser channel (Kondensatkanal) vorhanden. Durch diesen fließt das Kühlwasser.

2.4.3 Gained Output ratio (GOR)

Bei der Betrachtung der Effizienz einer Destillationsanlage ist der GOR- Wert ein wichtiges Bewertungskriterium. Die Gained Output Ratio ist gewissermaßen der Wärmerückgewinnungsfaktor. Er gibt das Verhältnis aus Verdampfungswärme des Destillats und der zugeführten Wärmeenergie an.

$$GOR = \frac{\dot{m}}{Q_{zu}} * \Delta Q_v * dt \quad [-]$$

Formel 34 : Berechnung der GOR-Werte

Hierbei ist \dot{m} der Massenstrom des Destillats. Dieser muss in unserem Falle über die Zeit integriert werden, da wir alle 10 Sekunden einen anderen Wert gemessen haben. Q_{zu} ist die zugeführte Wärme. Da man den GOR Wert nur für die einzelnen Module berechnen kann, wird hierfür der Wärmestrom Q_{2C} verwendet. Man könnte zwar versuchen, den GOR-Wert für die gesamte Anlage zu berechnen, also mit Q_{solar} statt Q_{2C} , allerdings gibt es von den solarthermischen Kollektoren bis zu den Entsalzungsmodulen weitere Effizienzeinbußen, sodass dieser Wert nicht mehr korrekt wäre. Da das Wärmeträgermedium bei der Destillatproduktion verdampft, muss die spezifische Verdampfungswärme von Wasser mit einbezogen werden. Diese gibt an, wie viele kWh benötigt werden, um ein Kilogramm Wasser zu verdampfen. Bei einem Siedepunkt von 100°C hat Wasser eine Verdampfungsenthalpie von 2,26 MJ/kg, dies entspricht 0,63 kWh/kg.

$$\Delta Q_v = 2,26 \text{ MJ/kg} = 0,63 \text{ kWh/kg}$$

3 Datenauswertung

In diesem Abschnitt soll die in Namibia implementierte Membrandestillationsanlage hinsichtlich der solarenergetischen Effizienz ausgewertet werden. In einem ersten Schritt werden hierfür der Aufbau der Anlage, die Zusammensetzung der drei Kreisläufe und das Zusammenwirken derselben erläutert. Anschließend soll näher auf die Betriebszustände eingegangen werden. Hierdurch sollte sich abzeichnen, wie und in welchen zeitlichen Verhältnissen sich die Energie innerhalb der Anlage verteilt.

Auf diesen Abschnitt folgt die energetische Auswertung der Anlage. Hierfür wird zuerst erläutert, wie die Wärmeströme in den unterschiedlichen Kreisläufen berechnet wurden. Diese Wärmeströme werden grundsätzlich in kWh angegeben. Nachdem alle Energiemengen erläutert und berechnet sind, wird detaillierter auf die Effizienz der Anlage eingegangen. Hierfür werden zuerst die GOR-Werte berechnet. Als nächstes wird auf den Wirkungsgrad der Solarkollektoren eingegangen und in einem letzten Schritt die Energiebilanz aufgestellt.

3.1 Datengrundlage

In diesem Abschnitt sollen die vom Fraunhofer ISE zur Verfügung gestellten Daten ausgewertet werden. Es werden hierfür die Messreihen der Monate November 2010, Juli 2011 und Dezember 2011 betrachtet. Während dieser Monate wurden jeden Tag permanent 44 Messungen alle 10 Sekunden durchgeführt. Das ergibt pro Tag 8.640 Messungen mal 44 Werte. Es wurden jeweils die Salinität und der Volumenstrom des Grundwassers, des eingespeisten Wassers und des Destillats gemessen. Des Weiteren wurden die Eingangs- und Ausgangstemperaturen an der kalten und der heißen Seite der Wärmeübertrager gemessen sowie die fünf Temperaturschichten des Speichertanks und die Temperaturunterschiede der Entsalzungsmodule. Es wurden außerdem die signifikante Kollektortemperatur gemessen sowie mehrere Umgebungstemperaturen. Ein weiterer wichtiger gemessener Wert ist der des Thermostatventils Mv1. Die noch fehlenden Werte sind Sicherheitssensoren, die Fehler innerhalb der Anlage wiedergeben.

3.2 Beschreibung der in Namibia in Betrieb genommenen Membrandestillationsanlage

In Amarika, Namibia, wurde im Juli 2010 eine Membrandestillationsanlage des Fraunhofer ISE in Betrieb genommen. Im Zuge dieser Arbeit sollen Messreihen aus den Monaten November 2010, Juli 2011 und Dezember 2011 genauer betrachtet und ausgewertet werden, um Aussagen über die solarenergetische Effizienz dieser Anlage hinsichtlich der GOR-Werte zu treffen.

Zu Beginn dieses Kapitels soll zuerst die Anlage vorgestellt werden. Sie ist in drei Kreisläufe unterteilt, welche zwar nicht autonom fungieren, aber jeweils ein spezielles Aufgabenfeld besitzen.

Die Kreisläufe:

1. Der Kollektorkreislauf
2. Der Speicherkreislauf
3. Die Entsalzung

Im Folgenden soll auf jeden Kreislauf eingegangen und die in besagtem Kreislauf gemessenen Parameter erklärt werden.

Im Anhang A befinden sich Fließdiagramme der im folgenden Abschnitt beschriebenen Kreisläufe.

3.2.1 Der Kollektorkreislauf

Der Kollektorkreis besteht momentan⁵ aus 30 funktionsfähigen solarthermischen Kollektoren. An diesen Kollektoren werden kontinuierlich die Temperaturen (T_{col1} , T_{col2}) der Kollektoren gemessen. Die Kollektoren sind an einen Wärmeübertrager (WÜ 1) angeschlossen. Das Wärmeträgermedium Wasser transportiert die Wärme durch die Leitungen zu dem Wärmeübertrager. Dort wird das durch die Kollektoren aufgewärmte Wasser in den Speicherkreislauf eingespeist. Der Wärmeübertrager stellt die Schnittstelle zwischen Stromkreis und Wärmekreislauf dar.

⁵ Zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme der Anlage bestand der Kollektorkreislauf aus 100 solarthermischen Kollektoren, davon ist heute ein Großteil defekt.

Darüber hinaus wird die Temperatur des Wärmeträgermediums vor und nach dem Passieren des Wärmeübertrager gemessen (T_{1Hin} , T_{1Hout}). Der Druck des Wärmeträgermediums (p_{col}) muss im Stromkreislauf niedrig gehalten werden. Wird dieser Druck zu hoch, dehnt sich das im Kreislauf befindliche Wasser aus und das 6-bar-Sicherheitsventil öffnet.

Um dem vorzubeugen, gibt es einen MET (Membrane Expansion Tank), in den das Wasser eingeleitet wird, falls es sich bei dem Erwärmungsprozess zu sehr ausdehnen sollte.

Damit der Kreislauf funktionsfähig ist, wird eine Pumpe benötigt. Diese sogenannte Kollektorpumpe sorgt für die Zirkulation des Trägermediums (vgl. User Manual, „Two Loop System, Elen“, S.13f).

3.2.2 Der Speicherkreislauf

Über die Speicherpumpe wird das Wasser durch den Speicherkreislauf gepumpt. Durch den Wärmeübertrager kommt Wärme aus dem Kollektorkreislauf und wird in den Entsalzungskreislauf gespeist. Das Thermostatventil ($Mv1$) kontrolliert die Temperatur des Wassers. Ist es zu heiß, wird es mit Wasser aus dem Tank vermischt. Bei zu geringer Temperatur wird hingegen das zirkulierende Wasser mit warmem Wasser des Rückkehrstromes des Wärmeübertrager 2 vermischt (T_{2Hout}).

Außerdem wird durch das Thermostatventil die Aufladung des Speichertanks ermöglicht. Das motorbetriebene Ventil ($Mv2$) kontrolliert die Speicherentladung, wenn keine Solarstrahlung vorhanden ist.

Steigt der Druck des Speichertanks aufgrund der Erhöhung der Temperatur zu sehr an, kann das Wasser durch das Bypass-Ventil (bypass valve) in den Ausdehnungstank (Expansion tank) ausgelagert werden.

Durch den Schwimmerschalter (Float switch) wird ein Niedrigwasserspiegel sowie der Wasserverlust im Speicherkreislauf kontrolliert. Durch die Sicherheitsventile (check valves) wird die Fließrichtung des Kreislaufs festgelegt. Über einen weiteren Wärmeübertrager ($WÜ2$) kann die Wärme des warmen Wassers in den Entsalzungskreislauf gelangen (vgl. User Manual, „Two Loop System, Elen“, S.13f).

3.2.3 Der Entsalzungskreislauf

Salzwasser wird in den Kreislauf eingespeist (feed in). Über einen magnetisch induktiven Durchflussmesser (MID) wird die Menge des eingeleiteten Salzwassers gemessen. Das Salzwasser wird über die Schwimmerventile (float valves) in den Rohwassertank eingeleitet. Dort wird es dem zirkulierenden Kühlwasser (cooled permeate) beigemischt. Sollten die Schwimmerventile defekt sein, kann auch über Ventil 2 (V2) Salzwasser in die Anlage gelangen.

Durch die Salzwasserpumpe wird das Wasser durch die Membrandestillationsmodule (Entsalzungsmodule) gepumpt.

Durch das über den Wärmeübertrager in den Entsalzungskreislauf eingespeiste heiße Speisewasser wird das Kühlwasser, innerhalb der Module, erhitzt. Dieses nun heiße Kühlwasser wird zusammengeführt, seine Temperaturen gemessen (T_{co1} , T_{co2} , T_{co3}) und wieder dem Wärmeübertrager 2 zugeführt. Das zu Beginn eingespeiste heiße Speisewasser kühlt während der Destillation ab. Es wird ein Phasenwechsel erzeugt, sodass sich flüssiges salzhaltiges Wasser in gasförmigen Wasserdampf verwandelt. Dieser Wasserdampf kann durch eine Membran diffundieren, während aufkonzentriertes Salzwasser zurückbleibt. 80% des aufkonzentrierten Salzwassers gelangen in den Kühlturm, die restlichen 20% werden als Brine aus dem Kreislauf entfernt. Das Destillat wird nun dem Frischwassertank zugeführt.

Wie bereits zu Beginn der Salzgehalt des Rohwassers (TDS_{raw}) gemessen wurde, wird nochmals der Salzgehalt des Destillats gemessen ($TDS_{dest.}$).

Nachdem das konzentrierte Salzwasser abgekühlt ist, wird es wieder mit dem frischen Salzwasser (feed in) vermischt (vgl. User Manual, „Two Loop System, Elen“, S.13f).

3.3 Die unterschiedlichen Betriebszustände

Die zuvor beschriebene Membrandestillationsanlage kann in vier verschiedenen Betriebszuständen betrieben werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Solarstrahlung nur tagsüber auftritt, die Anlage aber auch nachts betrieben werden soll. Im Folgenden werden diese vier möglichen Zustände beschrieben.

3.3.1 Betrieb in den Morgenstunden

Zu dieser Zeit ist der Speichertank noch nicht ganz geladen. Die Ventile (Mv1, Mv2) sind in einer A-C Position. Position B ist bei beiden Ventilen geschlossen. Das Wasser kann direkt von Wärmeübertrager 1 zu Wärmeübertrager 2 und umgekehrt fließen. Es wird kein Wasser mit dem Speichertank ausgetauscht. So werden die Entsalzungsmodule nur durch die Wärme von den solarthermischen Kollektoren betrieben.

3.3.2 Temperatur am Thermostatventil steigt über 75°C

Wird dieser Wert erreicht, schaltet das Thermostatventil (Mv1) automatisch in eine A-B-C Position. Das Wasser kommt aus A und B und wird gemischt nach C geleitet. Bei C wird somit durch den Thermostat eine Temperatur von 75°C gewährleistet.

Da ab 75°C nicht die komplette Wärme von den Kollektoren kommend benötigt wird, wird die überschüssige Wärme von oben in den Speichertank gefüllt. Das kältere Wasser aus den oberen Schichten wird im Tank nach unten gedrängt und gelangt in den B-Kanal. Mv2 bleibt in einer A-C Position, somit muss sich das kältere Wasser in Richtung Mv1 bewegen.

Sollte der Speichertank komplett geladen sein, sodass ihm kein kälteres Wasser mehr zugeführt werden kann und die Temperatur des Speisewassers innerhalb der Entsalzungsmodule 90°C überschreitet, so schaltet sich die Anlage automatisch ab. Die Entsalzungsmodule können somit nicht beschädigt werden.

Durch eine adäquate Dimensionierung der Anlage sollten 90°C niemals erreicht werden.

3.3.3 Betrieb in den Abendstunden

Dieser Zustand tritt ein, wenn die Wärme von den solarthermischen Kollektoren nicht ausreicht, um eine Mindesttemperatur von 75°C zu erzielen. Jetzt kann zusätzliche Wärme aus dem Speichertank eingespeist werden. Mv2 schaltet automatisch in eine A-B-C Position bringen und den Rücklaufstrom des Wärmeübertragers 2 in den Speichertank einspeisen. Heißes Wasser wird hingegen dem Wärmespeicher entnommen. Mv1 bleibt in einer A-C Position. Heißes Wasser kann nun in den Entsalzungskreislauf gelangen.

3.3.4 Betrieb ohne Globalstrahlung

In den Nachtstunden wird der tagsüber geladene Speichertank für den Entsalzungsprozess entladen. Hierfür ist Mv2 in einer A-B Position. Sollte die Temperatur im Tank 80°C überschreiten, so wird die Temperatur von Mv1 in der A-B-C Position durch Hinzufügen von kühlerem Wasser des Rücklaufstromes reguliert.

Sollte die Temperatur der oberen Schichten hingegen 80°C unterschreiten, so wird sich Mv1 in eine A-C Position bringen, womit der Speichertank bis zu einer minimalen Temperatur von 55°C entladen werden kann.

3.4 Energetische Auswertung der Anlage

Um eine Aussage über die energetische Effizienz der Anlage treffen zu können, muss der Wirkungsgrad der Kollektoren berechnet werden. Um dies zu erreichen, wurden zunächst die Wärmeströme in allen drei Kreisläufen berechnet beziehungsweise abgeschätzt. Der einzige Wärmestrom, welcher fix berechnet werden konnte, ist der Strom im Entsalzungskreislauf. Nur dort wird über ein MID der Volumenstrom gemessen. In allen weiteren Kreisläufen musste sich dann mit der Annahme von entsprechenden Verlusten beholfen werden.

Der energetischen Auswertung liegen Messdaten aus den Monaten November 2010, Juli 2011 und Dezember 2011 zugrunde. In diesen Zeiträumen wurden jeden Tag im 10-Sekunden-Rhythmus Temperaturen, Volumenströme, Globalstrahlung, Salinität und verschiedene Sicherheitsfaktoren gemessen. Dies waren 8.640 Messungen täglich.

3.4.1 Betrieb der Anlage

In diesem Abschnitt soll der Betrieb der Anlage verdeutlicht werden. Hierfür wird der Betrieb eines sonnigen Tages dem eines wolkigen Tages gegenübergestellt und verglichen.

In Abbildung 12 und Abbildung 13 sind nun die wichtigsten Werte des Entsalzungskreislaufes gegenübergestellt.

Zum Besseren Verständnis ist in Anhang A eine Skizze des Entsalzungskreislaufes dargestellt.

Man kann sehr gut erkennen, dass die Globalstrahlung an einem sonnigen Tag durch eine glatte, abgerundete Kurve dargestellt wird. Ist es jedoch bewölkt, so wird die Kurve sehr starke Einbrüche haben, wie am 19.11.10. Vergleicht man nun die Volumenströme, so fällt auf, dass der Volumenstrom des Destillats am 12.7.11 von 10:00 Uhr bis etwa 17:00 Uhr bei 150 l/h liegt, ab 17:00 Uhr nimmt der Volumenstrom des Destillats langsam ab. Am 19.11.10 ist hingegen nur ein geringerer Destillatvolumenstrom zwischen 12:00 Uhr und 14:00 Uhr vorhanden. Betrachtet man nun die Temperaturen, so ist festzuhalten, dass die Verdampfer inlet Temperatur (T_{vi}) den Prozess maßgeblich beeinflusst und durch die Einstellung des Thermostatventils vorgegeben wird. Sie sollte etwa 75°C erreichen. Um einen Phasenwechsel im Entsalzungsmodul zu erreichen ist eine Dampfdruckdifferenz notwendig. Diese entsteht durch die Temperaturunterschiede zwischen Verdampfer und Kondensatorkanal im Modul. Am 12.7.11 erreicht sie 75°C zwischen 10:00 Uhr und 20:00 Uhr. An besagtem bewölktem Tag werden die 75°C zwischen 12:00 Uhr und 17:00 Uhr erreicht. Trotz der Bewölkung wird eine relativ hohe Temperatur erreicht. Eine weitere wichtige Temperatur ist die Kondensat Ausgang Temperatur (T_{co}). Sie gibt die Temperatur des eingespeisten Speisewassers an, welche dem Wärmübertrager 2 zugeführt wird. Mit Hilfe der Wärme aus dem Speicherkreislauf wird diese Temperatur wieder auf 75°C erhöht. Betrachtet man nun den Feed Volumenstrom (V_{feed}), so ist klar, dass Destillat nur entstehen kann solange der V_{feed} vorhanden ist. Dies kann man gut an Abbildung 12 sehen. Zusammen mit der T_{vi} ist der V_{feed} einer der Haupteinflussfaktoren auf die produzierte Destillatmenge. In der Anlagenprogrammierung ist vorgegeben, dass mit einer Absenkung der Temperatur eine stufenweise Absenkung des V_{feed} einhergeht. Ab 55°C wird der V_{feed} ganz ausgeschaltet, da hier kein effizienter Betrieb mehr möglich ist. Aus diesem Grund ist am 19.11.10 der V_{feed} geringer, als am 12.07.11. An einem bewölkten Tag wird also dennoch Destillat produziert, jedoch weniger, da die Zeitspanne in der T_{vi} 75°C erreicht geringer ist. Durch einen höheren Bewölkungsgrad trifft weniger solare Einstrahlung auf die Kollektoren und somit ist weniger Wärme vorhanden um 75°C zu erzeugen.

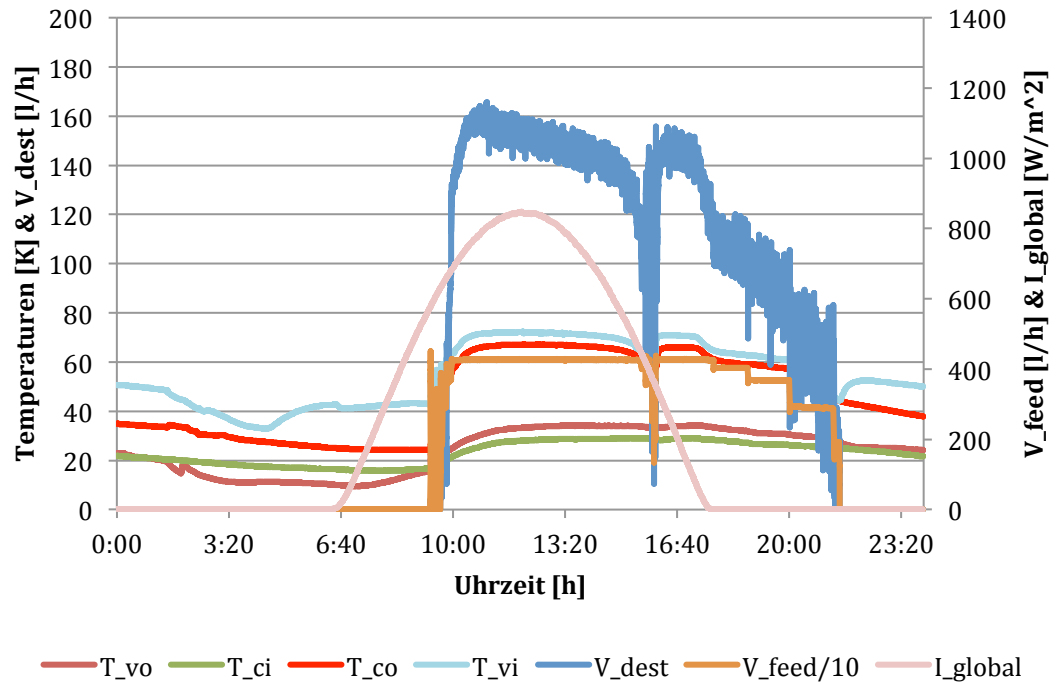


Abbildung 12 : Gegenüberstellung der Eckdaten des Entsalzungskreislaufs am 12.07.11 (sonnig)

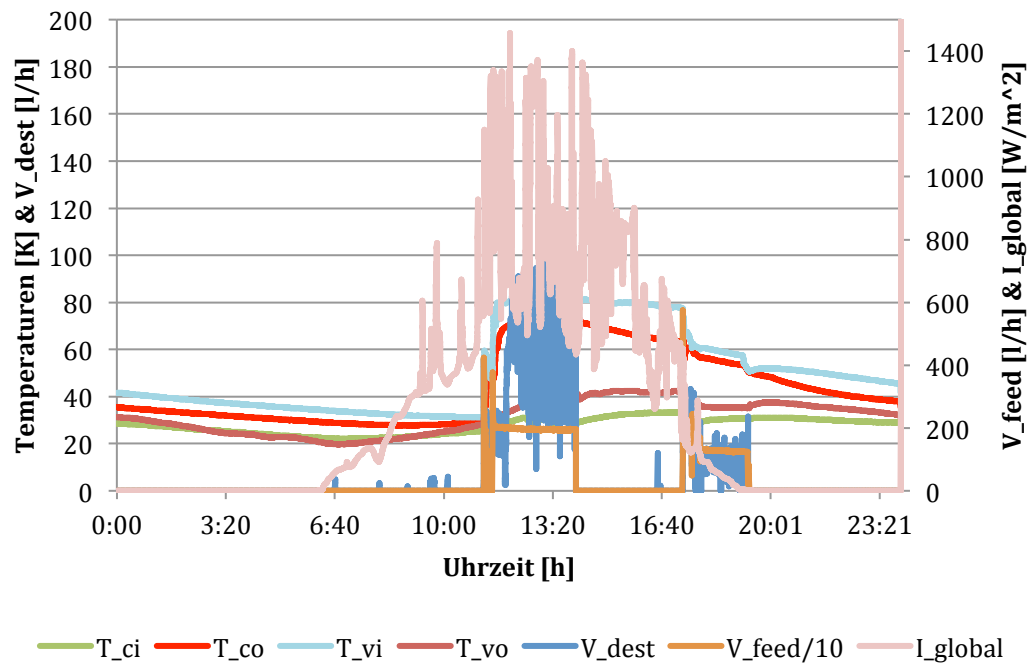


Abbildung 13 : Gegenüberstellung der Eckdaten des Entsalzungskreislaufes am 19.11.10 (wolkig)

3.4.2 Berechnung des Wärmestroms im Entsalzungskreislauf

Bei der Berechnung der Wärmeströme wurde vom Entsalzungskreislauf zum Kollektorkreislauf gearbeitet. Wie bereits beschrieben wurde, kann nur der ganz rechts befindliche Wärmestrom, an der Stelle 2C, eindeutig berechnet werden.

Um diesen Wärmestrom zu erhalten, muss zuerst der entsprechende Massenstrom berechnet werden. Da es im Entsalzungskreislauf ein MID gibt, welches den in die Entsalzungsmodule gelangenden Volumenstrom misst, kann der Massenstrom mit Formel 24 berechnet werden.

Wie im Abschnitt 2.1.2.1 beschrieben wurde, ist die Dichte abhängig von Temperatur und Salinität. Aus diesem Grund wurde zuerst die Dichte des Entsalzungskreislaufes mit den in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Formeln ermittelt.

Schaut man sich das Fließdiagramm des Entsalzungskreislaufs an, so kann man unschwer erkennen, dass das eingespeiste Salzwasser in die Entsalzungsmodule gelangt, dort erhitzt wird und diese mit einer höheren Temperatur wieder verlässt. Die Eingangstemperatur, T_{ci} , hat in der Regel einen Wert von etwa 30°C. T_{c0} schwankt allerdings Tageszeit abhängig zwischen 30 und 70°C. Im Zuge dieser Erwärmung entsteht eine Dampfdruckdifferenz zwischen heißer und kalter Seite. Das bedeutet ein Teil des Volumenstroms verdampft bei der Erhitzung durch eine Membran in den Destillatkanal hinein. Infolgedessen befindet sich nach den Entsalzungsmodulen ein geringerer Massenstrom als vor den besagten Modulen. Um eine genaue Aussage über den Wärmestrom an Stelle 2C treffen zu können, muss auch der exakte Massenstrom an dieser Stelle bekannt sein. Aus diesem Grund muss die Dichte an Stelle 2C berechnet werden. Diese kann nach Formel 12 berechnet werden. Im Mittel betrug die Dichte an Stelle 2C etwa $(1003-1005) \frac{kg}{m^3}$, vor den Entsalzungsmodulen betrug sie etwa $(1010-1012) \frac{kg}{m^3}$. Diese Änderung ist auf die geänderte Salinität zurückzuführen.

Nachdem wir nun den richtigen Massenstrom berechnet haben, fehlt noch die spezifische Wärmekapazität, diese ist auch von Salinität und Temperatur abhängig. Deswegen wurde sie auch an Stelle 2C nach Formel 7 berechnet. Als Datengrundlage hierfür müssen die Temperatur T_{2C} und die Salinität TDS_{feed} verwendet werden. In den Datensätzen ist TDS_{feed} in mS/cm angegeben. In den meisten Fällen sind das etwa 40 mS/cm. Dies entspricht nach Abbildung 3 etwa $20 \frac{g \text{ Salz}}{kg \text{ Salzwasser}}$. Die

Salinität des Destillats ist in den Datensätzen hingegen in $\mu\text{S}/\text{cm}$ angegeben und hat etwa den Wert $230 \mu\text{S}/\text{cm}$. Dies entspricht $0,23\text{mS}/\text{cm}$ und das sind etwa $0,046 \frac{\text{g Salz}}{\text{kg Salzwasser}}$. Nach Formel 7 beträgt die berechnete Wärmekapazität etwa $4,087 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$, dies liegt daran, dass diese mit zunehmender Salinität geringer wird.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es wichtig ist, die Dichte an Stelle 2C in Abhängigkeit von Temperatur und Salinität zu berechnen. Weiter muss die spezifische Wärmekapazität in Abhängigkeit von Temperatur und Salinität berechnet werden. Anhand dieser Randbedingungen kann der Wärmestrom nun an Stelle 2C berechnet werden. Dies wurde im 10-Sekunden-Rhythmus getan und am Ende des Tages aufsummiert. Dieser Wert wurde dann als Energie in kWh angegeben.

Um nun den Wärmestrom im Wärmekreislauf zu berechnen, wurde an beiden Wärmeübertragern jeweils ein Wirkungsgrad von 95% angenommen. Da die Wärme durch die solarthermischen Kollektoren entsteht, sollte der Wärmestrom an der Stelle 2H 5% größer sein als der an der Stelle 2C.

Leider erlaubt der Wärmestrom des Wärmeübertragers 2 keine Rückschlüsse auf den des Wärmeübertragers 1. Aufgrund des zwischengeschalteten Tanks und der zwei Ventile kann nicht davon ausgegangen werden, dass sich an Wärmeübertrager 1 zu jeder Zeit der gleiche Massenstrom wie an Wärmeübertrager 2 befindet. Aus diesem Grund wurde versucht, über die in 3.3 beschriebenen Betriebszustände Aussagen über die Wärmeströme an Stelle 1 zu treffen.

Außerdem wurde versucht, die Wärmeströme im Solarkreislauf über das Stefan-Boltzmann-Gesetz zu berechnen. Kommt man mit beiden Methoden auf dasselbe Ergebnis, so lässt das Verhältnis von Solarstrahlung und Wärmestrom im Kollektorkreislauf Rückschlüsse auf den Wirkungsgrad der Kollektoren zu.

3.4.3 Berechnung des Wärmestroms im Kollektorkreislauf

Um eine Aussage über den Wirkungsgrad der Kollektoren zu treffen, ist die Kenntnis des Wärmestroms im Kollektorkreislauf erforderlich. Da es aber kein MID in besagtem Kreislauf gibt, muss man sich mit verschiedenen Annahmen begnügen. Prinzipiell wurde der Wärmestrom

Q1C, hiermit ist der Wärmestrom des WÜ1 auf der kalten Seite gemeint, über eine Bilanzgleichung berechnet:

$$Q1C = \text{solar_use} + Q1,2C$$

Formel 35 : Bilanzgleichung zur Berechnung des Q1C

Der Wert solar_use ist hierbei die Energiemenge, welche im Kollektorkreislauf entsteht. Diese wird über den gemessenen Wert sig_valve berechnet. Sig_valve steht für den signifikanten Wert des Thermostatventils. Ist dieser Wert 100, so gelangen 100% der Energie des Kollektorkreislaufs in die Entsalzungsmodule. Ist dieser Wert 0, so gelangen 100% der Energie aus dem Speicher in die Entsalzungsmodule. Nun kann die Energiemenge, die dem Speicher entnommen wird, sowie die Energiemenge des Kollektorkreislaufs, welche im Entsalzungskreislauf ankommt, berechnet werden. In Abbildung 13 ist der Wert sig_valve gezeichnet. Verwirrend erscheint zunächst, dass zu der Zeit, in der sig_valve 100 erreicht wird, trotzdem die Temperatur im Tank ansteigt. Es wird somit heißes Wasser in den Tank eingespeist. Dies ist auf den Rücklaufstrom zurückzuführen. Die Energiemenge an WÜ 2 gelangt zurück in den Speicherkreislauf.

Zu beachten ist, dass die Energiemenge, solar_use, nicht die gesamte Energiemenge ist, welche im Kollektorkreislauf entsteht. Hinzu kommt noch der Wert Q1,2C. Dieser Wert ist die Energiemenge Q2H, und zwar zu den Zeiten, zu denen die Temperaturen im Speichertank konstant sind. Folglich erfolgt kein Energieaustausch mit dem Tank. In Abbildung 14 kann man gut erkennen, dass dies eine zusätzliche Energiemenge ist, welche über den Tag verteilt am WÜ1 ankommt.

Aus diesen zwei Werten kann nun der Wärmestrom auf der kalten Seite des WÜ1, Q1C, mit Hilfe von Formel 35 berechnet werden.

Um sicherzugehen, dass diese Bilanz stimmt, wurde zusätzlich die Energiemenge auf der heißen Seite des WÜ2 berechnet:

$$Q2H = Q1C - \text{load_in_storage} + \text{storage_use}$$

Formel 36 : Bilanzgleichung zur Berechnung des Q2H

$$\text{load_in_storage} = Q1H - \text{solar_use}$$

Formel 37 : Berechnung der in den Tank eingespeisten Energiemenge

Der Wärmestrom Q_{1C} wurde im folgenden Abschnitt berechnet. Sobald die Temperatur T_{1Cout} über 75°C steigt, wird das Wärmeträgermedium in den Tank eingespeist. Dies kann man in Abbildung 13 an den steigenden Temperaturschichten des Speichers sehen. Diese Energiemenge wird mit Formel 37 berechnet. Wie bereits beschrieben, hat man für den WÜ1 einen Wirkungsgrad von 95% angenommen. Somit kann leicht von Q_{1C} in Q_{1H} umgerechnet werden. Nun fehlt noch der Wert $storage_use$. Dieser ist, wie im vorigen Abschnitt beschrieben, auch von dem Wert sig_valve abhängig. Solange dieser Wert 0 ist, kann für $storage_use$ der Wert Q_{2H} angenommen werden. Es kann also ein weiterer Wert für den Wärmestrom im Entsalzungskreislauf ermittelt werden. In Abbildung 13 ist auch dies gut erkennbar. Man sieht, dass die Temperaturen sinken, sobald das signifikante Thermostatventil 0 beträgt. Der Tank wird entladen.

Insgesamt wurden nun zwei Werte für den Wärmestrom an WÜ2 berechnet. Zum einen über das MID unter Berücksichtigung des Salzgehaltes (siehe Abschnitt 3.4.2) und zum anderen über die beschriebene Bilanzgleichung. Diese zwei Werte weichen im Schnitt etwa 10% voneinander ab. Hierbei ist der Wert der Formel 36 etwas kleiner.

Es wurden zwei Werte berechnet um die Ergebnisse zu verifizieren. Fraglich ist nun woraus eine zehn prozentige Abweichung entsteht. Fakt ist, dass die Werte, die über das MID berechnet wurden genauer sind. Der Wert aus Formel 36 müsste größer sein. In den Tabellen und Grafiken wurde für Q_2 immer der nach Abschnitt 3.4.2 berechnete Wärmestrom verwendet.

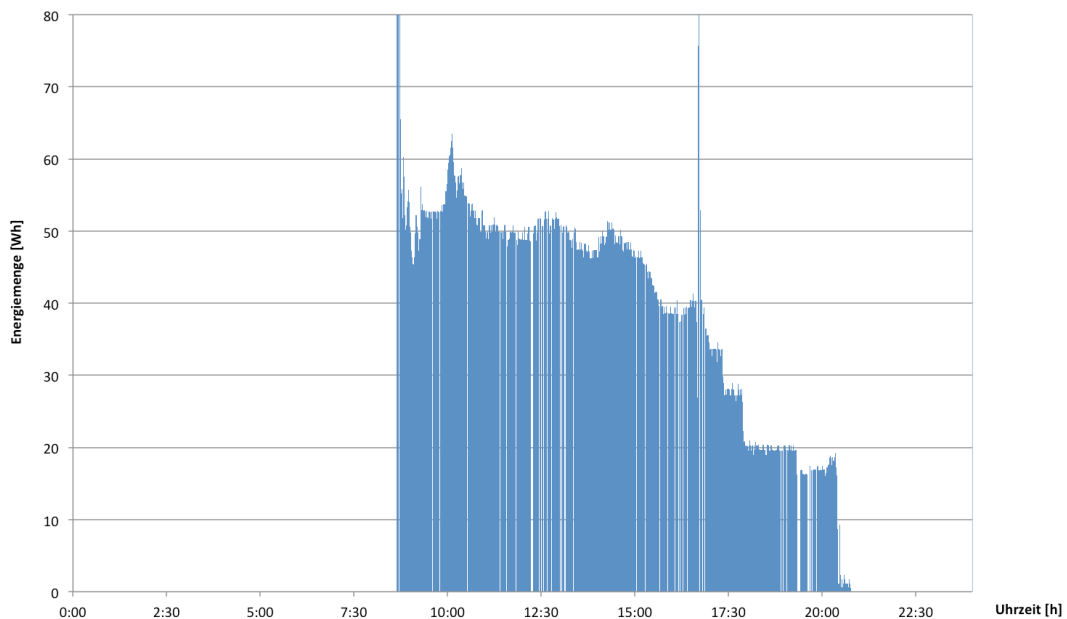


Abbildung 14 : Q1,2C am 10.12.2011

Wie bereits erwähnt wurde mit Abbildung 14 der Wert Q1,2C bestimmt. Dieser Wert ist die Energiemenge, zu Zeiten in denen kein Austausch mit dem Speicher stattfindet. Dies ist die Energiemenge Q2C, wenn die oberen Temperaturschichten des Speichers konstant sind. Zu diesen Zeiten kann Q2C gleich Q1C angenommen werden. Da dieser Wert für jede Zeile berechnet wurde bezieht er sich auf 10 Sekunden Intervalle. Aus diesem Grund sind die Werte auch sehr gering. Dieser Wert ist zur Berechnung von Q1C über Formel 35 notwendig. Zu beachten ist, dass über diesen Rechenweg die Werte pro Zeile ermittelt und gemittelt werden müssen. Zeilen mit dem Wert 0 sind zu vernachlässigen. Dies ist also die Energiemenge, die direkt von den Kollektoren zur Entsalzungseinheit geleitet wird.

3.4.4 Berechnung des Wärmestroms im Kollektorkreislauf mit Hilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes

Die Globalstrahlung, welche auf die Flachkollektoren trifft, kann nach Formel 33 berechnet werden. Hat man diesen Wert ermittelt, so weiß man zwar, wie viel Energie auf die solarthermischen Kollektoren trifft, jedoch nicht, welcher Anteil davon tatsächlich in den Kollektorkreislauf gelangt.

Nun gibt es den Ansatz, die Energiemenge zu berechnen, welche aufgrund der Temperaturdifferenz aus der Temperatur in den

Flachkollektoren und der Umgebungstemperatur entsteht. Problematisch ist hierbei, dass man nicht weiß, wie viel von dieser Energie tatsächlich im Kollektorkreislauf landet. Man benötigt den zuvor berechneten Wirkungsgrad:

$$\dot{Q} = \varepsilon * \sigma * \Delta T^4 * A * \frac{t}{3.600 * 1.000} \quad [\text{kWh}]$$

Formel 38 : Boltzmann-Gesetz angepasst

Berechnet man nun den Wärmestrom nach Formel 38, so sollte man den Wärmestrom erhalten, welcher im Kollektorkreislauf ankommt.

Dies wurde nach dieser Vorgehensweise für die gesamten drei Monate durchgeführt, wobei t jeweils die Zeitintervalle von in der Regel 10 Sekunden sind. Am Ende jedes Tages wurde dieser Wert aufsummiert und man erhielt die tägliche Energiemenge, welche der Anlage zugeführt wurde.

3.4.5 Beschreibung der Vakuum-Flachkollektoren

Ecosol 2.32

In Amerika sind momentan 30 funktionsfähige Kollektoren vom Typ Ecosol 232 der belgischen Firma ESE (European Solar Engineering) implementiert. Ein technisches Problem besteht darin, dass ursprünglich im Juli 2010 100 solarthermischen Kollektoren in Betrieb genommen wurden. Aus produktionstechnischen Gründen haben sich jedoch die Glasverkleidungen gelöst und die Vakuum-Flachkollektoren wurden defekt. Die Firma ESE konnte vor ihrer Insolvenz 30 Kollektoren nachliefern. Die 100 zu Beginn installierten Kollektoren, die teilweise defekt waren, und die neu gelieferten Kollektoren werden regelmäßig auf ihre Funktionsfähigkeit überprüft.

Aktuell sind seit dem 1. Dezember 2010 30 funktionsfähige solarthermische Kollektoren in Betrieb. Über diese soll eine Aussage bezüglich ihrer Effizienz getroffen werden. Interessant ist hierbei, ob die vom Hersteller gegebenen Randbedingungen eingehalten werden können.

Tabelle 6 : Technische Daten der Solarkollektoren Ecosol 2.32

Optische Oberfläche	[m ²]	2,32
Absorptionskoeffizient	[%]	95
Emissionskoeffizient	[%]	5
Energetische Transmission des Glases	[%]	96
Größe ohne Verkleidung	[mm]	2.050*1.210*75
Gewicht ohne Verkleidung	[kg]	48
Größe mit Verkleidung	[mm]	2.090*1.250*75
Gewicht mit Verkleidung	[kg]	49

Wie in Abschnitt 2.3.3 beschrieben wurde, wird hier der Konversionsfaktor berechnet:

$$h_0 = 0,96 * 0,95 = \underline{0,912}$$

Des Weiteren wurde vom Hersteller der Emissionskoeffizient angegeben. Dieser gibt an, wie viel Strahlungsenergie ein Körper gegenüber einem schwarzen Strahler an die Umgebung abgibt. Dieser Konversionsfaktor muss mit der Emission multipliziert werden. Wir wissen jetzt, dass unser Absorbermaterial 5%, das Glas 4% und die Emission 5% beträgt. Aus diesen drei Werten können wir den vom Hersteller angegebenen Emissionsgrad des Solarmoduls berechnen:

$$\varepsilon = h_0 * (1-0,05) = 0,912 * (1-0,05) = \underline{0,8664 \rightarrow 86,64\%}$$

Dieser Wert gibt den gesamten Emissionsfaktor eines einzelnen Solarmoduls an, er gibt aber nicht den Wirkungsgrad des Kollektorkreislaufs an. Diese 86,64% entsprechen dem Unterschied zwischen einem Schwarzkörper und einem Graukörper.

Der Wirkungsgrad eines Flachkollektors ist abhängig von einer Temperaturdifferenz. Die signifikante Kollektortemperatur und die Umgebungstemperatur. In Abbildung 15 ist diese Kennlinie dargestellt. An ihr kann man sehr gut erkennen, dass der Wirkungsgrad bei keiner Temperaturdifferenz maximal ist, also wenn die signifikante Kollektortemperatur der Umgebungstemperatur entspricht. In diesem Fall wäre der optische Wirkungsgrad 81%. Je

größer die Temperaturdifferenz wird, desto kleiner wird der Wirkungsgrad, da die Verluste an die Umgebung zunehmen.

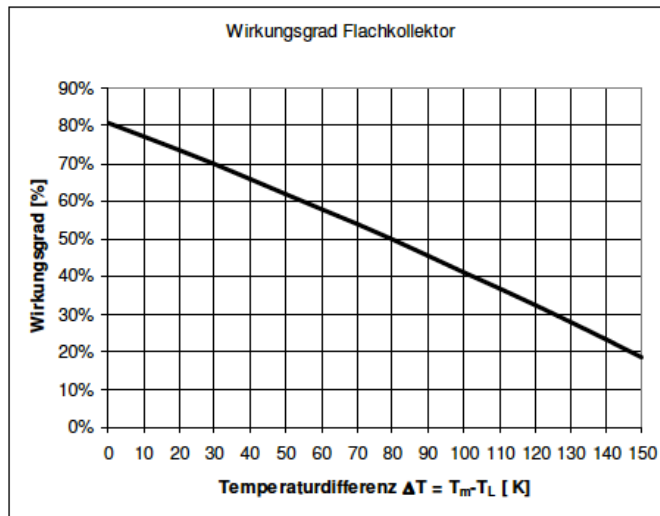


Abbildung 15 : Wirkungsgrad nach Angaben des Herstellers (vgl. www.me-systems.eu)

3.4.6 Gegenüberstellung der Wärmeströme im Kollektorkreislauf

In den letzten Abschnitten wurde beschrieben, wie die Wärmeströme berechnet wurden. Nun wurden auf zwei verschiedenen Wegen die Wärmeströme im Kollektorkreislauf berechnet. Zum einen aus der Bilanzgleichung und zum anderen über das Stefan-Boltzmann-Gesetz. Wichtig ist nun, diese zwei Ergebnisse zu unterscheiden und gegeneinander abzuwägen.

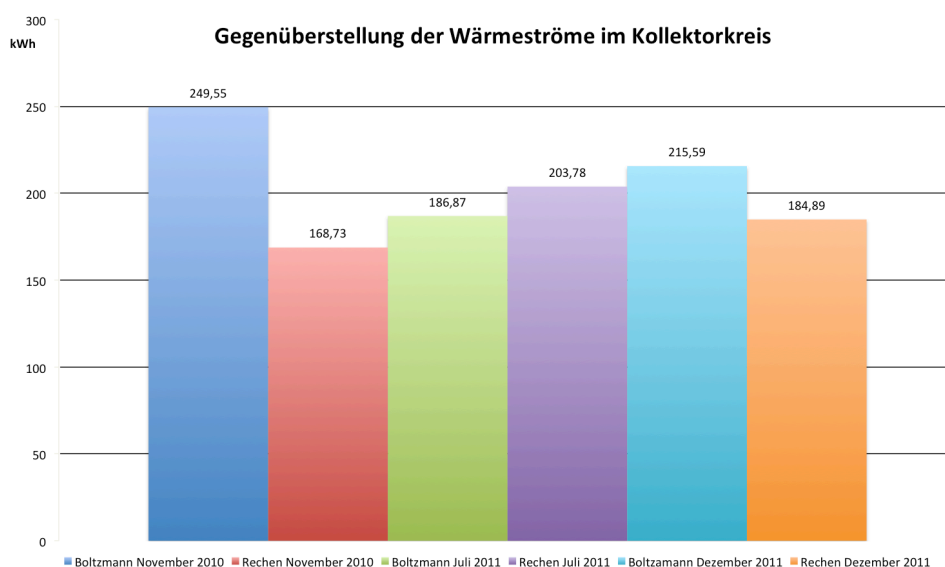


Abbildung 16 : Mittelwerte der Wärmeströme (kWh) an der heißen Seite des WÜ1

In Abbildung 16 sind die aus dem Stefan-Boltzmann-Gesetz und aus der Bilanzgleichung entstandenen Energiemengen der jeweiligen Monate eingetragen. Hieraus wird ersichtlich, dass die zwei Werte nur im November stark voneinander abweichen, und zwar um etwa 32%. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass im November an mehreren Tagen die Kollektorpumpe nicht richtig funktionierte, Diese Tage wurden zwar bei der Berechnung nicht berücksichtigt, es gab aber dennoch Tage an denen im Kollektorkreis eine Energiemenge entstand welche aber viel geringer als die Energiemenge aus dem Stefan-Boltzmann-Gesetz war. Diese Werte konnten nicht gelöscht werden, da auch bei geringen 90 kWh Wasser entsalzen wird. Das Stefan-Boltzmann-Gesetz errechnet unabhängig hiervon die Energie über eine Temperaturdifferenz aus, diese ist trotz des geringeren Volumenstroms vorhanden.

Betrachtet man nun den Juli 2011, so erkennt man, dass die Werte in diesem Monat relativ nah beieinander liegen. Sie weichen nur um 8,3% voneinander ab. Interessant ist hierbei, dass der Boltzmann-Wert geringer ist als der über die Bilanzgleichung errechnete Wert. Dies liegt daran, dass die Globalstrahlung im Juli geringer war als in den anderen zwei Monaten. Außerdem sind die Werte der ersten sechs Tage aufgrund der fehlenden Volumenströme im Entsalzungskreislauf sehr gering. Normalerweise sollte der Energieeintrag der Sonne bei 420-450 kWh liegen, im Juli werden allerdings nur 385 kWh erreicht. Im Dezember weichen die Werte um etwa 15% voneinander ab. Der Wert, der sich über das Boltzmann-Gesetz errechnen lässt, ist größer.

Abschließend lässt sich sagen, dass das Stefan-Boltzmann-Gesetz durchaus einen Wert liefert, an dem man sich orientieren kann. Wichtig ist aber, dass dieser nur die Energiemenge aufgrund einer Temperaturdifferenz wiedergibt. Dieses Gesetz könnte eventuell für eine anfängliche Dimensionierung zu Rate gezogen werden, wenn man beispielsweise eine neue Anlage konzipieren möchte und die örtlichen Gegebenheiten kennt.

Sind jedoch Messreihen gegeben, wie in unserem Fall, so sollte man sich eher nach den über die Bilanzgleichung berechneten Werten richten. Nichtsdestoweniger war es in diesem Fall von Vorteil, die Werte abzugleichen. Bei einer Schwankung zwischen 5 und 15 Prozent befindet man sich schließlich auf dem richtigen Weg.

Im Anhang C befinden sich Tabellen mit allen berechneten Wärmeströmen.

3.4.7 GOR-Werte der Entsalzungsmodule

Nach der in Abschnitt 2.4.3 vorgestellten Formel wurde hier die Gained Output Ratio für die einzelnen Module berechnet. Die Werte wurden an jedem Tag jeweils im 10-Sekunden-Takt berechnet und dann gemittelt. Die hier vorgestellten Werte sind die Mittelwerte der drei Monate.

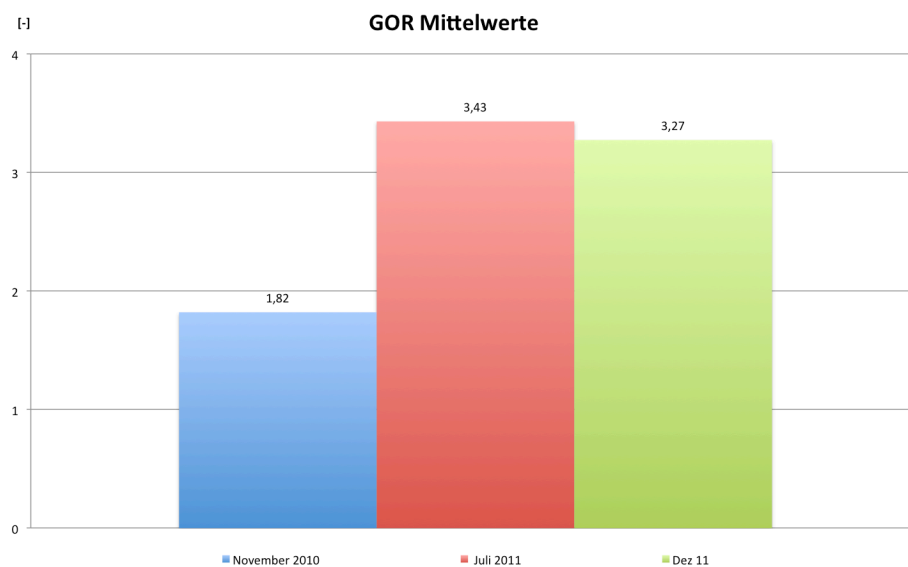


Abbildung 17 : Gained Output Ratio der drei Monate

Zu erkennen ist hier, dass die Werte von Juli und Dezember einander sehr ähnlich sind. In diesen zwei Monaten hat die Anlage recht gut funktioniert. Im November war die Anlage allerdings weniger effizient. Dies ist wiederum darauf zurückzuführen, dass die verschiedenen Pumpen des Öfteren nicht richtig funktioniert haben.

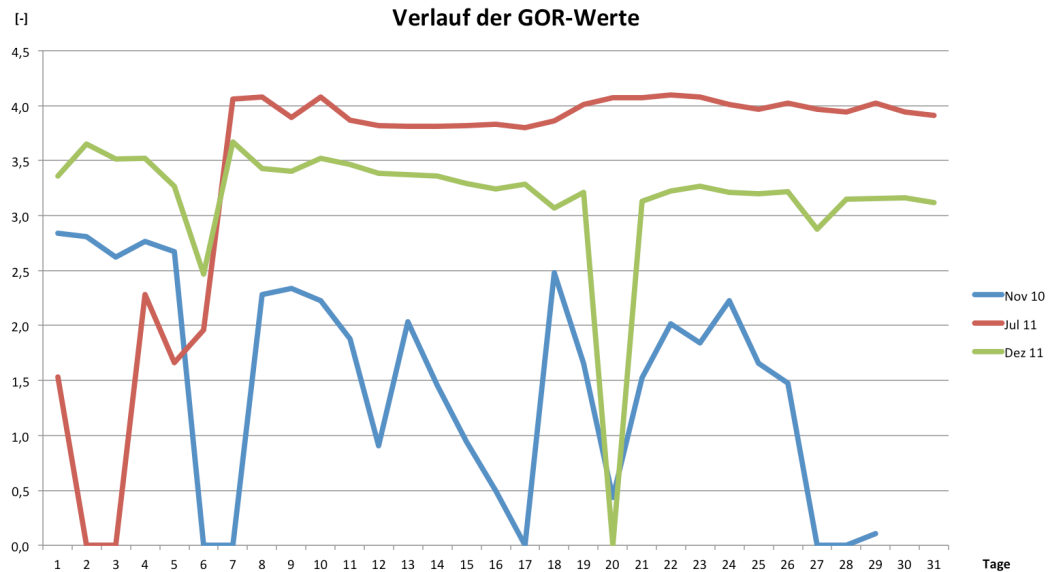


Abbildung 18 : Verlauf der GOR-Werte

In Abbildung 18 sind die monatlichen Verläufe der GOR-Werte gegeben. Man sieht hier sofort, dass die Werte im November zu gering waren. Dies ist auf die zuvor erwähnten Ausfälle der Pumpen zurückzuführen. Im Juli hingegen sehen die Werte ab dem sechsten Tag sehr gut aus. In den ersten sechs Tagen gab es keine konstanten Volumenströme, wodurch die GOR-Werte erst langsam ihr Maximum erreicht haben. Allerdings bleibt dieser Wert nach dem Erreichen mehr oder weniger konstant.

Betrachtet man nun den Monat Dezember, so ist zu erkennen, dass die Werte nicht konstant bei 3,5 bleiben, sondern abnehmen. Dies ist auf eine Abnahme der Destillatproduktion zurückzuführen. Der Einbruch am Tag 20 liegt an den fehlenden Volumenströmen an besagtem Tag.

Abschließend lässt sich zu den GOR-Werten sagen, dass diese im Monat Juli konstant sind. Im Monat Dezember nehmen sie allerdings langsam ab. Diese Abnahme ist auf einen leichten Rückgang der Wärmemenge Q2C zurückzuführen. Der Unterschied zwischen Juli und Dezember ist hingegen auf eine Veränderung der Salinität im Feed zurückzuführen. Die Dichte nimmt jedoch mit zunehmender Salinität zu. Es lässt sich also sagen, dass bei höherer Salinität ein geringerer GOR-Wert erreicht wird, da bei einer höheren Salinität mehr Energie für den Entsalzungsprozess benötigt wird. Somit herrscht im Dezember eine höhere Salinität als im Juli vor.

Die Werte von November 2010 sind extrem unregelmäßig, da in diesem Zeitraum die Anlage nicht vollständig funktioniert hat. Dieser Monat sollte bei einer Betrachtung über einen längeren Zeitraum nicht mit einbezogen werden.

Man kann festlegen, dass der GOR-Wert der Entsalzungsmodule zwischen 3,27 und 3,43 liegt.

3.4.8 Berechnung der Wirkungsgrade

Die Berechnung der Kollektorwirkungsgrade hat drei Werte ergeben. Es wurde zum einen der Wirkungsgrad über das Stefan-Boltzmann-Gesetz berechnet. Hierfür wurde das Verhältnis von Q_{1H_bolz} und Q_{solar} betrachtet. Zum anderen wurde das Verhältnis von Q_{1H_rechen} und Q_{solar} betrachtet. Als letztes wurde das Verhältnis von $Q_{1,2C}$ und Q_{solar} betrachtet. Hierzu sei erwähnt, dass für letzteren Fall der Wirkungsgrad für jede Spalte einzeln berechnet wurde, da diese Energiemenge zu gering ist, um sie in ein Verhältnis zur Sonnenenergie zu setzen. Für die Q_{1H_Rechen} Werte war dies nicht möglich, da dieser Wert über die Bilanzgleichung bestimmt wurde, und somit keine zeitabhängigen Werte vorhanden sind.

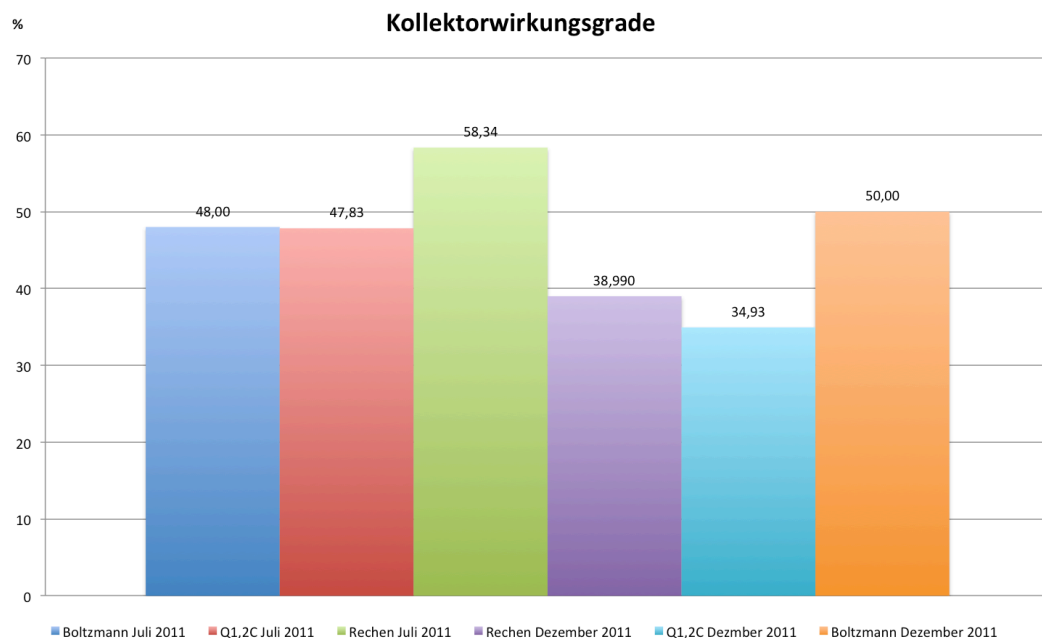


Abbildung 19 : Kollektorwirkungsgrade

In Abbildung 19 sind alle Kollektorwirkungsgrade aufgezeichnet. Nun geht es darum, hieraus einen effektiven Wirkungsgrad zu berechnen. Wie wir in der vorigen Auswertung bemerkt haben, hatte die Anlage im November 2010 einige Stillstände wegen technischer Probleme. Es gab recht viele Pumpenausfälle und Ähnliches. Aus diesem Grund werden die Wirkungsgradverläufe von November 2010 nicht dargestellt. Es gibt zu viele Schwankungen, die eine sinnvolle Aussage unmöglich machen. Auch die Wirkungsgrade des Boltzmann-Gesetzes werden nicht berücksichtigt. Wie bereits erwähnt, dienen diese zwar als Orientierung, sie sind aber für unseren Fall nicht maßgebend. Nun bleiben noch die Wirkungsgrade aus Q1H_rechen und Q1,2C.

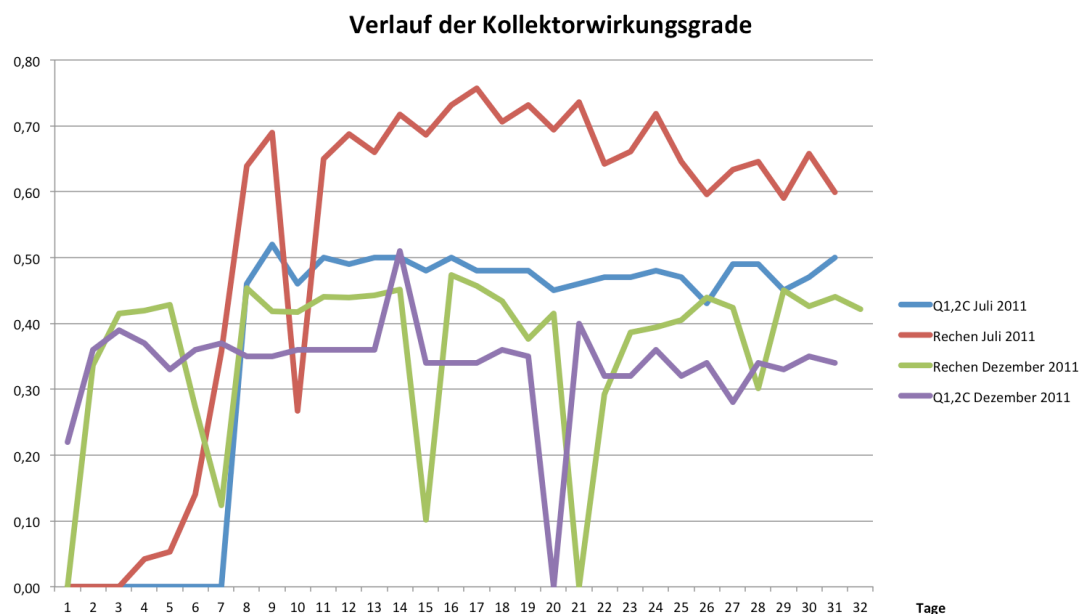


Abbildung 20 : Verlauf der Kollektorwirkungsgrade

Betrachtet man nun Abbildung 20, so wird eine Aussage über einen Wirkungsgrad schon einfacher. Hier sehen wir, dass die Wirkungsgrade in der Regel zwischen 30 und 50 Prozent liegen, mit Ausnahme des rechnerischen Wirkungsgrades von Juli 2011. Hieraus wird ersichtlich, dass wir keinen Wirkungsgrad für den gesamten Zeitraum festlegen können. Wir müssen vielmehr einen Wirkungsgrad für Dezember und einen für Juli festlegen. In dieser Zeit hat sich der Wirkungsgrad der Solarkollektoren erheblich verändert. Um einen genaueren Wert zu bekommen, wurde ohnehin der Wirkungsgrad Q1,2C eingeführt. Dieser gibt den energetischen Eintrag ohne eine Zwischenschaltung des Speichers an. Dies bedeutet, dass dieser Wert

genauer ist, da er durch keine durch den Speicher ausgelösten Verluste verändert wird und kein Rücklaufstrom des Entsalzungskreislaufes vorhanden ist. Es bedeutet aber nicht, dass dies die einzige Energiemenge ist. Die rechnerischen Wirkungsgrade beinhalten den Rücklaufstrom und sind somit höher.

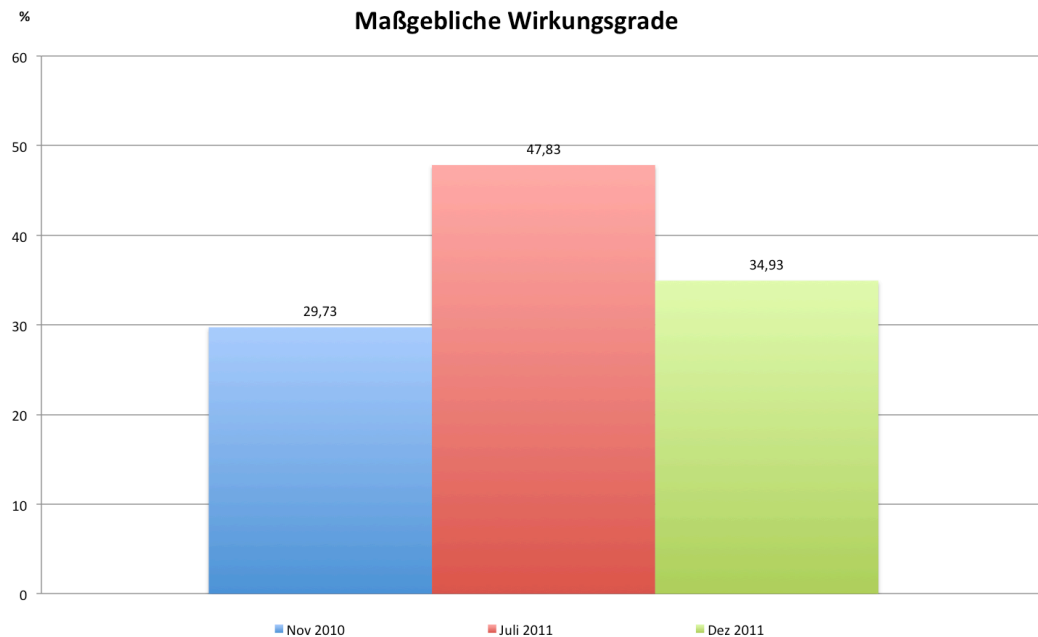


Abbildung 21 : Maßgebliche Kollektorwirkungsgrade

In Abbildung 21 wurden nun die drei maßgeblichen Wirkungsgrade dargestellt. Dies sind die Wirkungsgrade aus Q1,2C, also die Wirkungsgrade, die errechnet wurden, als kein Rücklaufstrom oder Speicher zwischengeschaltet war. Hier kann auch eine Aussage über den Monat November 2010 getroffen werden. Schließlich wurden diese Wirkungsgrade für jede Zeile, also im 10-Sekunden-Rhythmus berechnet. Im November gab es schließlich auch einige Tage, an denen die Anlage funktionierte.

Diese maßgeblichen Kollektorwirkungsgrade werden als effektiver Wirkungsgrad festgelegt. Somit beträgt der Wirkungsgrad für November 2010 30%, für Juli 2011 48% und für Dezember 35%. Es gelangen also 30 bzw. 48 bzw. 35 Prozent der Energie aus der Globalstrahlung in den Kollektorkreislauf.

3.4.9 Vergleich der maßgeblichen Wirkungsgrade mit den Daten des Herstellers

Um die unter vorigem Abschnitt festgelegten Wirkungsgrade bewerten zu können sollten diese noch mit den vom Hersteller „European Solar Engineering“ vorgegebenen Werten verglichen werden. Wie unter Abschnitt 3.4.5 beschrieben nimmt der Wirkungsgrad mit Zunahme der Temperaturdifferenz ab. Liegt keine Temperaturdifferenz vor liegt der Wirkungsgrad bei 81%, siehe hierzu Abbildung 15. Die restliche 19% sind optische Verluste. Es werden für jeden der drei Monate jeweils ein charakteristischer Tag betrachtet.

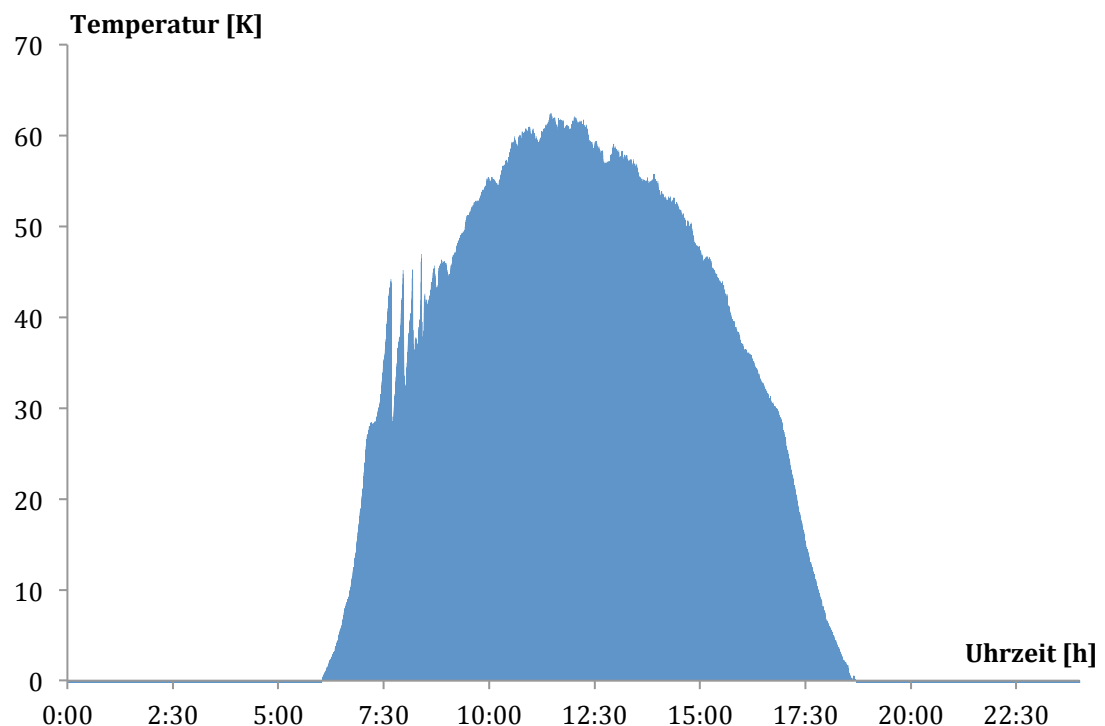


Abbildung 22 : Temperaturdifferenz $\Delta T = T_{\text{coll_sig}} - T_{\text{amb}}$, für den 10.12.11

Anhand von Abbildung 22 sieht man sehr gut, dass gegen 6 Uhr morgens die Temperatur zunimmt, am Mittag gegen 12 Uhr erreicht sie ihren Höhepunkt und nimmt dann wieder langsam ab. Will man hieraus mit Hilfe von Abbildung 15 einen mittleren Wirkungsgrad berechnen, so würde dieser für den 10.12.2011 58,48% ergeben. Dieser Wert entstand durch die prozentuale Veränderung der Temperaturdifferenz und einem Abgleich mit Abbildung 15.

In Abbildung 23 sind die Temperaturdifferenzen des 19.11.10 dargestellt. Hieraus würde dann laut Hersteller ein Wirkungsgrad von 64,17% entstehen. Dieser höhere Wirkungsgrad gegenüber dem 10.

Dezember ist auf die geringere Temperaturdifferenz von 10K zurückzuführen.

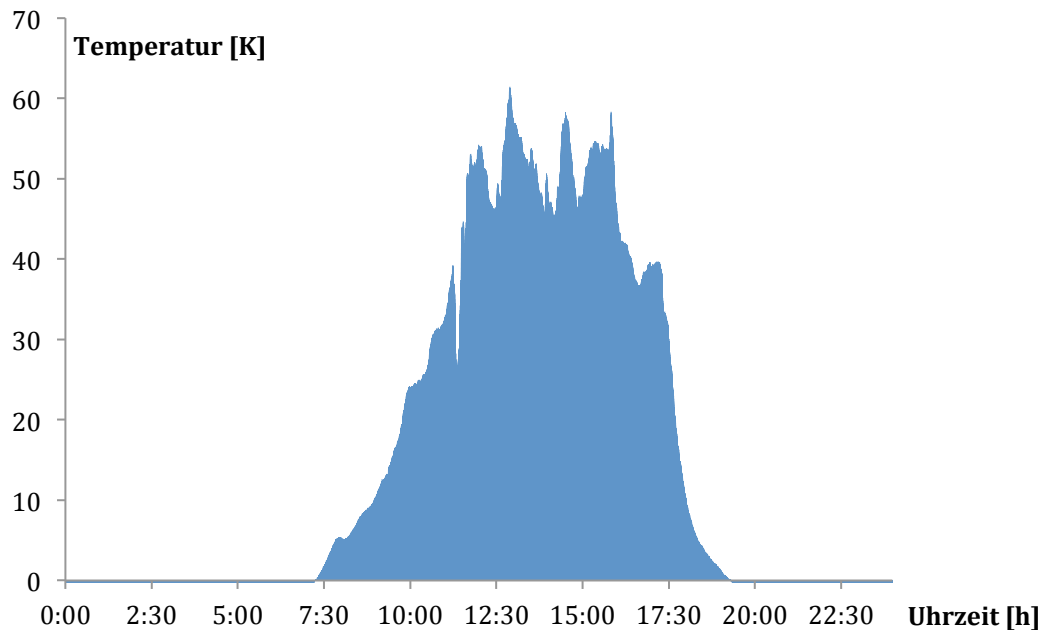


Abbildung 23 : Temperaturdifferenz $\Delta T = T_{\text{coll_sig}} - T_{\text{amb}}$, für den 19.11.10

In Abbildung 24 ist die Temperaturdifferenz für den 12.7.11 dargestellt. Aus dieser Differenz ergibt sich ein Wirkungsgrad von 57,14%. Aufgrund dieser drei Werte kann man festlegen, dass aufgrund der Aussage des Herstellers und der Funktionalität der Membrandestillationsanlage ein Wirkungsgrad von etwa 58% vorherrschen müsste. Jedenfalls an Tagen, an denen die Temperaturdifferenz normalverteilt ist, wie in Abbildung 22 und Abbildung 24.

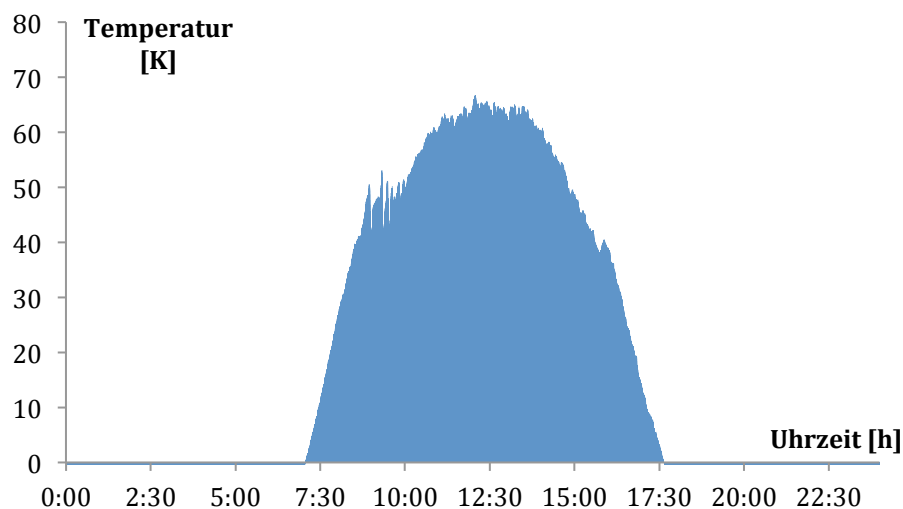
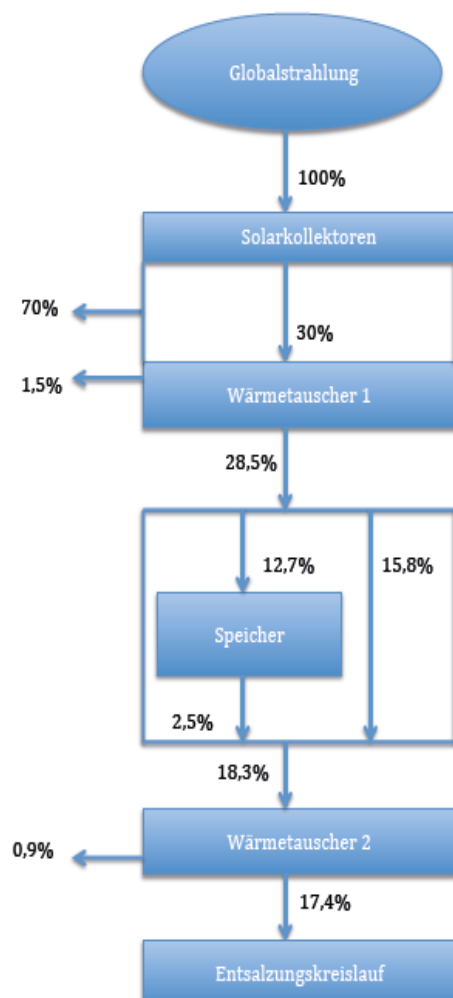


Abbildung 24 : Temperaturdifferenz $\Delta T = T_{\text{coll_sig}} - T_{\text{amb}}$, für den 12.07.11

Fraglich ist nun, warum aufgrund unserer Auswertung im vorigen Abschnitt im Dezember nur 35% zu Stande kommen? Zu beachten ist hierbei, dass der Wirkungsgrad der Kollektoren sich im Laufe eines Tages mehrfach ändert. Legt man einen maßgeblichen Wirkungsgrad fest, so wie das hier getan wurde, so darf man nicht vergessen, dass sich diese Werte über den ganzen Tag bzw. Monat verteilt ergeben. Betrachtet man aber nur einen kurzen Zeitraum, so wie zum Beispiel in Abbildung 24, so kann dieser Wirkungsgrad höher bzw. geringer sein. Außerdem gelten die Werte des Herstellers für den Betrieb von nur einem Solarmodul. In unserem Fall haben wir allerdings eine Parallelschaltung von 30 Modulen, sodass hier weitere Verluste entstehen. Die Werte des Herstellers dienen somit nur zur Orientierung, die tatsächlich erreichbaren Werte sind bei solch einer Anlage eher geringer. Ein weiterer Grund dieser Abweichung könnte an der Bestrahlungsstärke E liegen.

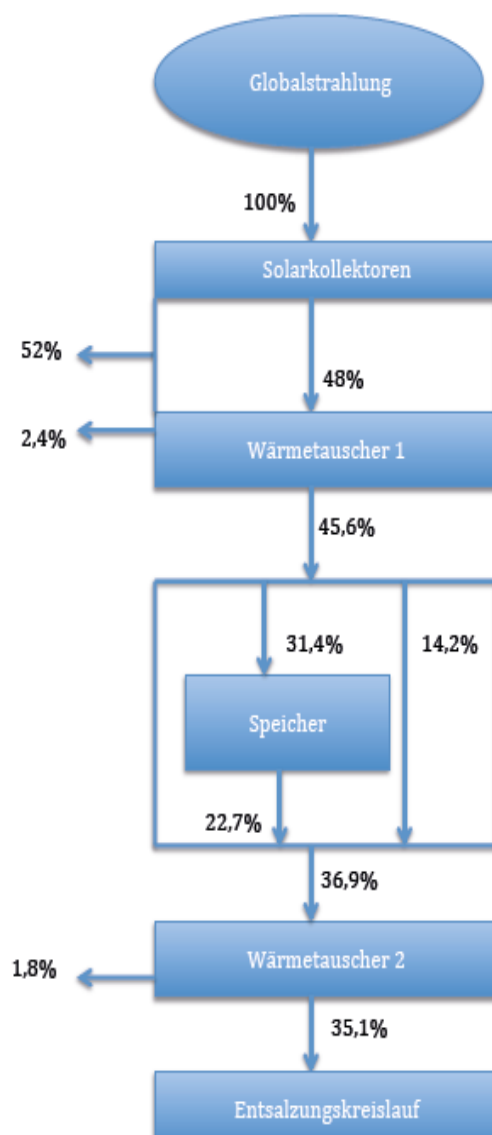
3.4.10 Energiebilanz



Nachdem die Wirkungsgrade nun festgelegt wurden, kann eine Energiebilanz erstellt werden. Schließlich ist es bei einer energetischen Betrachtung wichtig zu wissen, wo sich Optimierungspotenziale befinden und wo Energie verloren geht. Bei dieser Bilanz ist es wichtig, sich immer auf den Eintrag der Sonnenenergie zu beziehen. Dies ist in den Tabellen der Wert Q_{solar} . Gegenüber gestellt werden ein charakteristisch sonniger und wolkiger Tag. Zu Beginn kommen 100% Sonnenenergie an und je nach Wirkungsgrad erreicht ein gewisser Prozentsatz den Kollektorkreislauf. Aufgrund des Wirkungsgrades wissen wir, wie viel Prozent der Energie auf der heißen Seite des ersten Wärmeübertragers ankommt.

Abbildung 25 : Energiebilanz 19. November 2010

Nun kann das Verhältnis zwischen kalter Seite und Sonnenenergie bestimmt werden. Die Differenz zur heißen Seite ist der Verlust des Wärmeübertragers. Wir haben zwar zu Beginn einen Wert von 5% angenommen, dies war jedoch auf den jeweiligen Wärmestrom bezogen und nicht auf einen von der Sonnenenergie abhängigen Prozentsatz. Aus diesem Grund muss auch der Verlust des zweiten Wärmeübertragers prozentual geringer sein als der Verlust des ersten Wärmeübertragers. Über die Verhältnisse aus „load in storage“ und „storage use“ zu der Sonnenenergie wurde dann der Prozentsatz dieser Werte berechnet. Über die Verhältnisse der Energien des zweiten Wärmeübertragers zu der Sonne wissen wir, wie viel Energie dort letztendlich ankommt und wie groß der dortige Verlust ist.



In Abbildung 25 ist die Energiebilanz des 19. Novembers dargestellt. Dies war ein sehr wolkyer Tag. An diesem Tag entstanden 400,17 kWh Energie aus der Globalstrahlung. Abzüglich der Verluste und des Wirkungsgrads erreichen 28,5% (114,05 kWh) der Energie den Speicherkreislauf. Hiervon werden 12,7% (50,82 kWh) in den Speichertank eingespeist und ihm wiederum 2,5% (10,00 kWh) entnommen. Diese geringen Werte sind auf die geringe Globalstrahlung aufgrund der Bewölkung zurückzuführen.

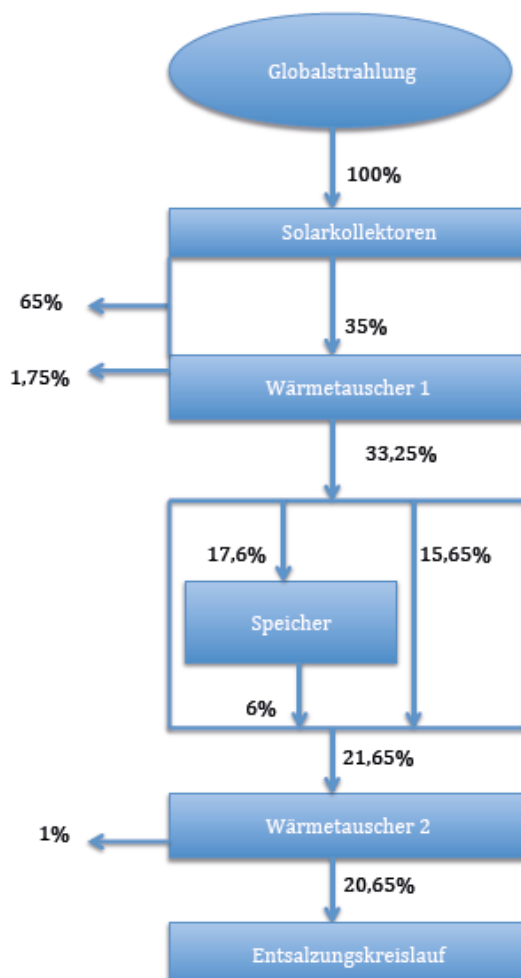
Abbildung 26 : Energiebilanz
12. Juli 2011

Die restlichen 15,8% (63,22 kWh) werden dem Wärmeübertrager 2 zugeführt ohne mit dem Tank in Verbindung zu stehen.

Die 28,5% entstehen durch das Verhältnis aus Q_{solar} und Q_{1C} . Die 12,7%, entstehen durch das Verhältnis aus Q_{solar} und „load in storage“, die 2,5% ergeben sich aus Q_{solar} und „storage use“. Die 18,3% welche den Wärmeübertrager 2 erreichen ergeben sich aus dem Verhältnis Q_{solar} und Q_{2C} .

In Abbildung 26 ist die Energiebilanz vom 12. Juli 2011 dargestellt. In diesem Monat gelangt eine sehr hohe solare Einstrahlung aufgrund des hohen Wirkungsgrades in den Speicherkreislauf.

Es entstanden hier 403,37 kWh Energie aus der Globalstrahlung. Vergleicht man diese Bilanz mit der des 19. Novembers, so ist auffällig, dass aufgrund des höheren Wirkungsgrades zwar mehr Energie in den Speicherkreislauf gelangt, dennoch ist die Energiemenge, welche ohne Kontakt mit dem Speicher dem Wärmeübertrager 2 zugeführt wird fast identisch. Im Juli sind das 14,2% und im November waren es 15,8%.



Weiter ist interessant zu sehen, dass die Energiemenge, welche im Speicher verbleibt auch nahezu identisch ist. Im November waren es 10,2% und im Juli 8,7%. Somit ist auch die Energiemenge, welche den Wärmeübertrager 2 erreicht an beiden Tagen identisch. Der Unterschied ist nur bedingt durch den unterschiedlichen Wirkungsgrad. Würde man also den selben Wirkungsgrad annehmen hätte man zwei identische Energiebilanzen.

In Abbildung 27 ist die Energiebilanz vom 10. Dezember 2011 dargestellt. Hier entstanden 537,1 kWh Energie durch die Globalstrahlung. Im Dezember erreichen etwa 35% (187,99 kWh) der

Globalstrahlung den Wärmeübertrager.

Abbildung 27 : Energiebilanz 10. Dezember 2011

Vergleicht man diese Bilanz mit den anderen zwei Bilanzen, so fällt eines sofort auf: Es entstehen an jedem der drei Tage etwa 10% Wärmeverluste im Speicher. Etwa 15% der Energiemenge gehen am Speicher vorbei und erreichen den Wärmeübertrager 2. Der einzige Unterschied ist somit der unterschiedliche Wirkungsgrad. Abhängig von ihm kommt an jedem der drei Tage eine unterschiedliche Menge an Energie in den Speicherkreislauf und letztendlich auch in den Entsalzungskreislauf.

4 Fazit

Die dieser Bachelor-Thesis zu Grunde liegende Aufgabe war eine „Untersuchung zur solarenergetischen Effizienz einer Membrandestillationsanlage“. Hierzu wurde eine im Norden Namibias implementierte Membrandestillationsanlage untersucht. In Kooperation mit dem Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme wurden Datenreihen für drei Monate zur Verfügung gestellt, untersucht und ausgewertet. Die zugrunde liegenden Monate waren November 2010, Dezember 2011 und Juli 2011. Es wurden an jedem Tag alle 10 Sekunden Messdaten erfasst. In regelmäßigen Abständen wird diese Anlage vorort gewartet und analysiert.

Zur Auswertung der Anlage wurden zuerst die verschiedenen Wärmeströme an den charakteristischen Stellen der Anlage in kWh berechnet. Zum Einen die Energiemenge, welche durch die Sonneneinstrahlung geliefert wird, die Energiemenge welche tatsächlich im Kollektorkreislauf ankommt, die Energiemenge welche in den Speichertank eingespeist wird und jene welche ihm wieder entnommen wird. Zuletzt wurde die Energiemenge welche den Entsalzungsmodulen zur Verfügung steht ermittelt.

Mit dem Wissen über die Energiemengen konnte eine Aussage über die Wirkungsgrade getroffen werden. Bei solch einer Anlage ist es allerdings recht schwer einen endgültigen bzw. maßgeblichen Wirkungsgrad festzulegen. Der Wirkungsgrad ist schließlich von der Temperaturdifferenz aus signifikanter Kollektortemperatur und Umgebungstemperatur abhängig. Nach Angaben des Herstellers beträgt der Wirkungsgrad eines einzelnen Moduls bei Außentemperatur gleich signifikanter Kollektortemperatur 81%. Allerdings verändert sich die Temperaturdifferenz im Laufe des Tages und somit auch der Wirkungsgrad. Letztendlich wurde für jeden der drei Monate ein maßgeblicher Wirkungsgrad festgelegt. Dies wurde unter

Berücksichtigung aller Randbedingungen getan, damit man festlegen kann wie viel Energie tatsächlich im Kollektorkreislauf ankommt. Im November 2010 waren das 30%, im Juli 2011 48% und im Dezember 2011 35%. Diese Unterschiede sind auf kleinere Ausfälle der Anlage oder Wetterbedingungen zurückzuführen.

Mit der Information über die Wirkungsgrade konnten drei Energiebilanzen aufgestellt werden, jeweils eine für einen charakteristischen Tag im Monat. Diese Energiebilanzen beziehen sich prozentual auf die eingestrahlte Sonnenenergie. So konnte schnell erkannt werden, dass in der Regel etwa 10% an Verlusten im Speicher verlorengehen und 15% den Entsalzungskreislauf erreichen ohne mit dem Speicher in Verbindung zu treten. Der Prozentsatz, welcher letztendlich im Entsalzungskreislauf ankommt ist Abhängig von den verschiedenen Wirkungsgraden, da die Prozentsätze im Speicherkreislauf nahezu identisch sind. Es lässt sich aus diesen Bilanzen also folgern, dass mit jeder weiteren Erhöhung der Wirkungsgrade proportional die im Entsalzungskreislauf ankommende Energie erhöht wird und somit auch das Destillat ergo Trinkwasser.

Nun wurde noch versucht die tatsächliche Effizienz der Anlage zu beziffern. Dies wurde mit Hilfe des Gained Output Ratio (GOR) getan. Der GOR-Wert ist das Verhältnis aus dem Massenstrom des Destillats und der Verdampfungsenthalpie gegenüber der zugeführten Energie. Diese Werte wurden dann über die gesamten Zeiträume integriert. Wichtig war hierbei auf die Salinität zu achten. Mit einer Zunahme der Salinität nimmt die Dichte zu. Je größer die Dichte, desto größer der Massenstrom und desto größer die zugeführte Energie. Je größer die zugeführte Energie allerdings ist, desto kleiner wird der GOR-Wert. Es lässt sich somit folgern: je höher die Salinität ist, desto mehr Energie wird für die Entsalzung benötigt und desto ineffizienter ist die Anlage.

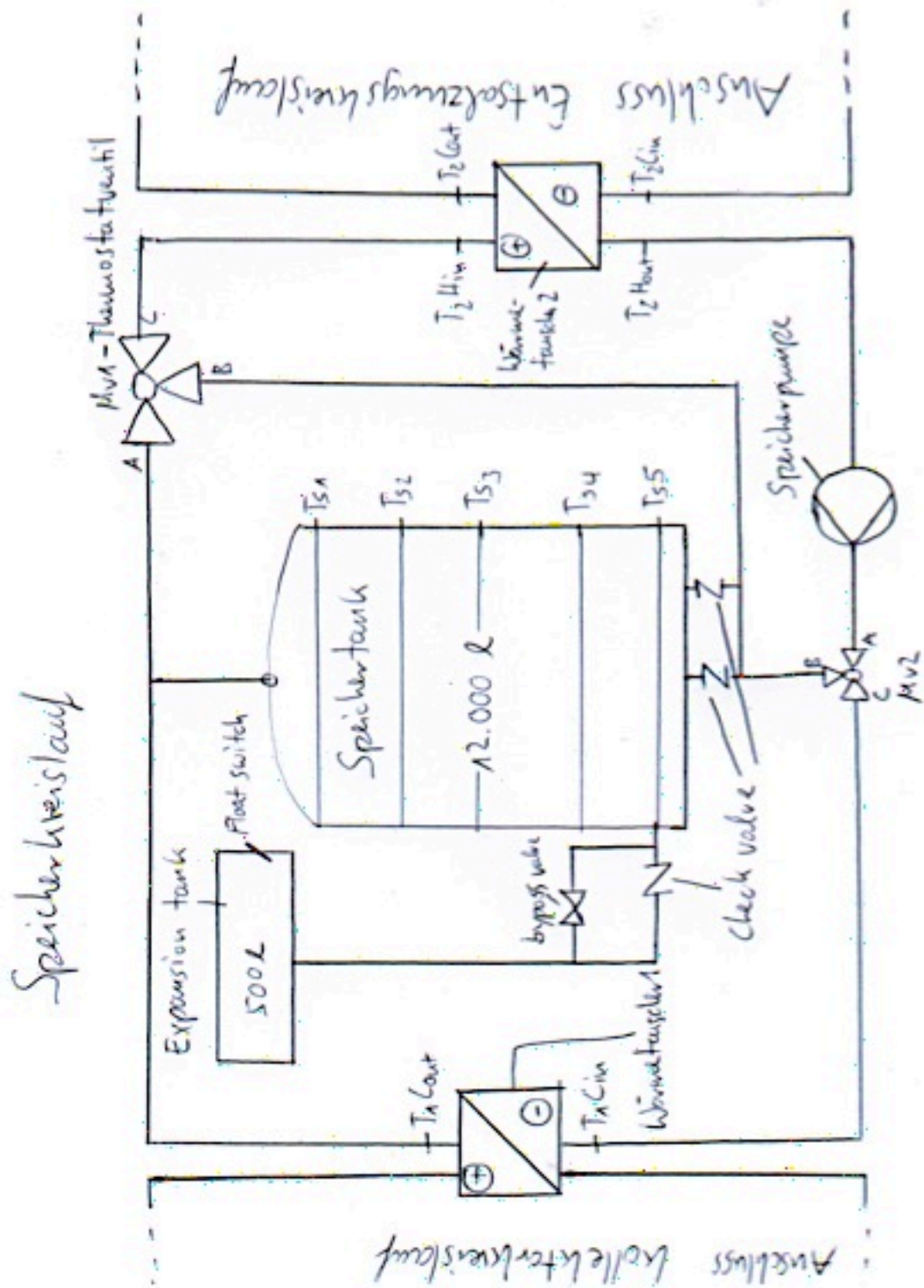
Im Juli blieb der GOR-Wert konstant bei 3,43. Im Dezember war er hingegen geringer und nahm leicht ab, der Mittelwert betrug hier 3,27. Somit war die Salinität im Dezember etwas höher.

Die Regenzeit ist in Namibia von November bis März. Unsere Untersuchung weist in dieser Zeit eine höhere Salinität auf. Aufgrund der geologischen Eigenschaften der Etosha-Salzpflanne ist der Untergrund stark salzhaltig. Es wäre möglich, dass in der Regenzeit zum Teil Salz aus dem Boden in das Grundwasser geschwemmt wird und somit der Salzgehalt im Grundwasser kurzfristig etwas ansteigt.

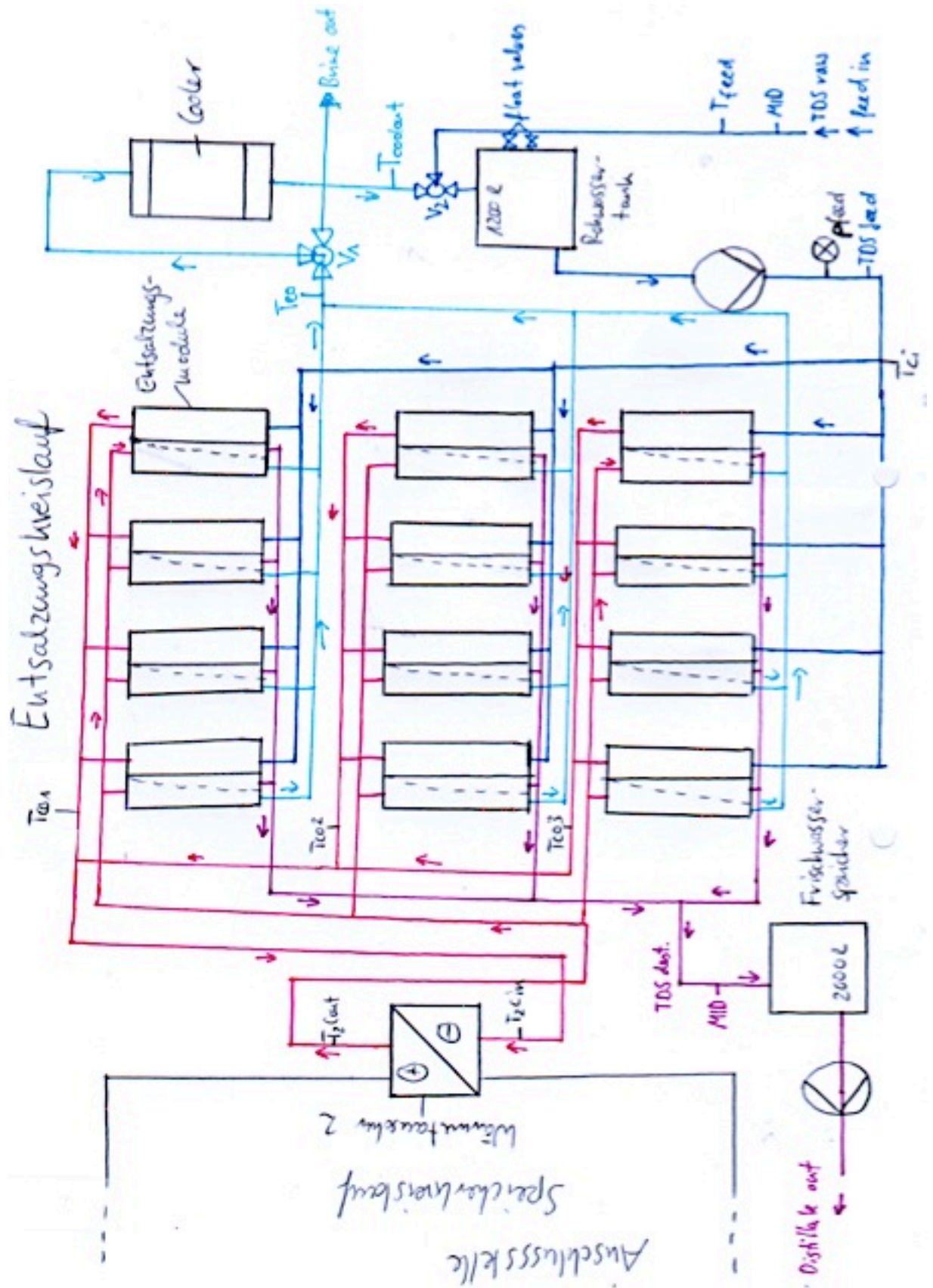
Letztendlich lässt sich festhalten, dass solch eine Anlage selbst mit einem geringen Wirkungsgrad sehr nützlich sein kann. Gäbe es im Norden Namibias nicht dieses Projekt, so wäre die Wasserversorgung gefährdet. Diese Gegend ist so abgelegen, dass sie nicht an die öffentlichen Versorger angeschlossen ist. Forschungen auf diesen Gebieten sind deshalb sehr nützlich, denn würde man es schaffen den Wirkungsgrad der solarthermischen Kollektoren weiter zu erhöhen, so wäre die Gewinnspanne im Besonderen deren Nutzen sehr hoch, da sich jede Erhöhung in der entstehenden Menge Trinkwasser widerspiegeln wird.

Da Bekanntlich jeder Mensch gleichberechtigt ist, aber nicht jeder die selben Möglichkeiten hat ist es wichtig, dass die entwicklungsstarken Länder im Westen den Entwicklungsländern weiter unter die Arme greifen, damit Menschen welche in abgelegenen Gegenden geboren werden trotzdem Zugriff auf sauberes Wasser haben.

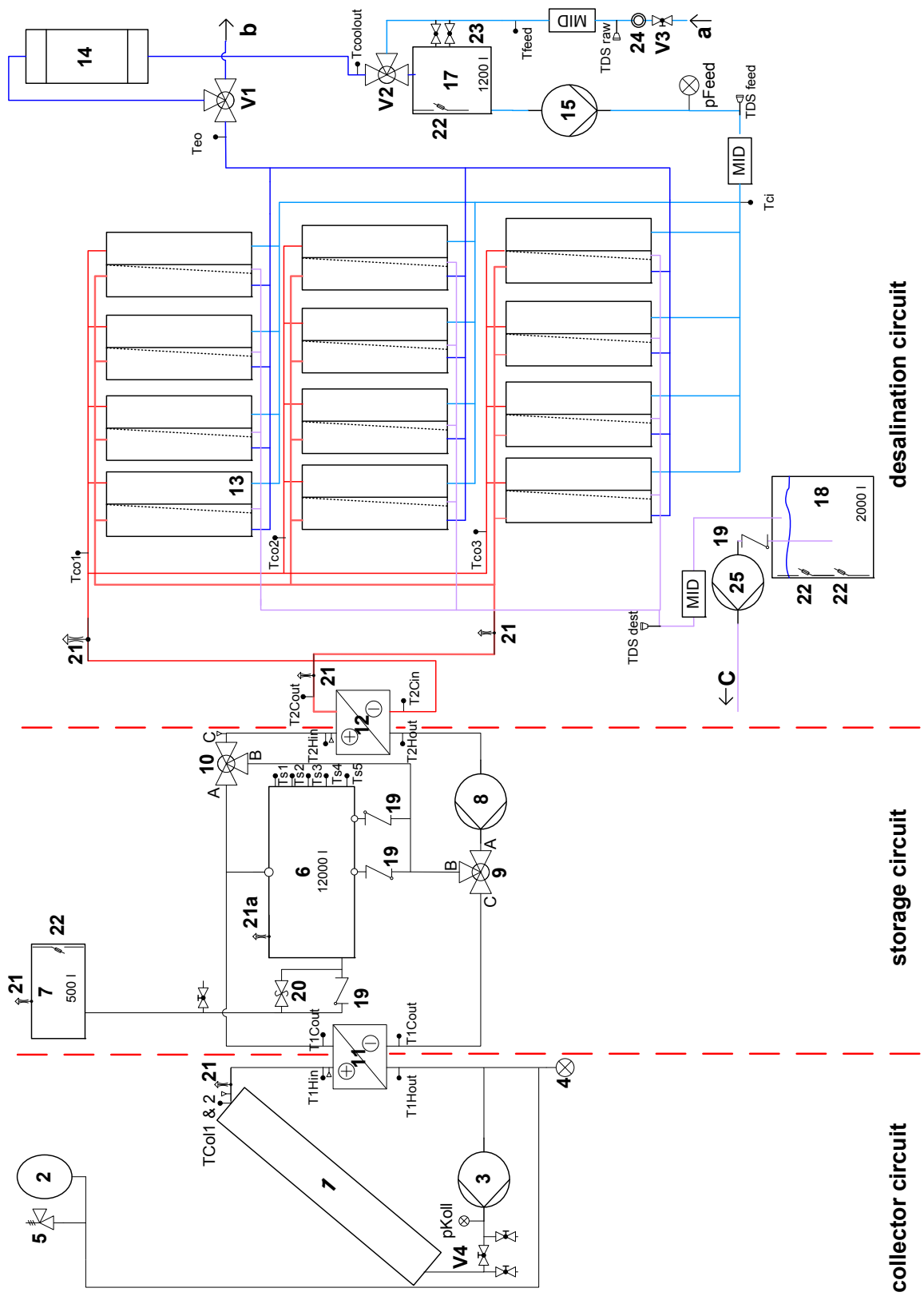
Der Speicherkreislauf



Der Entsalzungskreislauf



Alle Kreisläufe



B. Datenqualität

Hier wird im Besonderen auf die Qualität geachtet. (++) bedeutet, alle Daten sind in Ordnung. (+) bedeutet, die Daten sind einigermaßen in Ordnung. (--) bedeutet, es liegen größere Fehler vor. In Tabelle 8 werden diese Fehler genauer beschrieben.

November 2010

Tabelle 7 : Datenqualität November 2010

Datum ▼	Vollständigkeit ▼	Fehlerbehaftet ▼	Qualität der Globalst ▼	Globalstrahlung [W/m ²] ▼
01.11.10	-	---	++	567,42
02.11.10	++	---	++	532,08
03.11.10	++	---	++	576,1573597
04.11.10	++	---	++	545,1170388
05.11.10	++	---	++	551,0058464
06.11.10	++	---	++	579,3006739
07.11.10	++	---	++	524,0402658
08.11.10	++	---	+	573,4930968
09.11.10	++	---	++	595,2874417
10.11.10	++	---	++	600,0722778
11.11.10	++	---	++	581,0961375
12.11.10	-	---	+	583,9140811
13.11.10	+	---	-	485,3387356
14.11.10	++	---	---	309,8844327
15.11.10	++	---	---	399,5717234
16.11.10	---	---	---	312,3222857
17.11.10	---	---	---	514,8029335
18.11.10	++	---	---	409,5153495
19.11.10	++	---	---	430,4815641
20.11.10	---	---	---	535,5157545
21.11.10	+	---	-	550,9086848
22.11.10	---	---	---	494,2463291
23.11.10	---	---	---	568,0029179
24.11.10	---	---	---	644,5624908
25.11.10	---	---	---	583,7272026
26.11.10	---	---	---	344,530685
27.11.10	++	---	---	422,8996776
28.11.10	---	---	++	61,57987778
29.11.10	-	---	-	534,2533382
30.11.10				

Tabelle 8 : Bemerkungen zu den einzelnen Tagen im November 2010

Datum2	Bemerkungen
01.11.10	Fehlende Messung zwischen 14.09 Uhr und 15.10 Uhr
02.11.10	
03.11.10	
04.11.10	leichter Knick zu Beginn
05.11.10	
06.11.10	
07.11.10	
08.11.10	leichte Einbrüche am Morgen
09.11.10	
10.11.10	
11.11.10	
12.11.10	Es fehlen ca. 200 Messungen, leichte Einbrüche der Globalstrahlung
13.11.10	Mittlere Einbrüche, fehlen ca. 40 Messungen
14.11.10	Starke Einbrüche
15.11.10	Starke Einbrüche
16.11.10	Starke Einbrüche, nur bis 21 Uhr
17.11.10	Starke Einbrüche, erst ab 8.37 Uhr
18.11.10	Starke Einbrüche
19.11.10	Starke Einbrüche
20.11.10	Starke Einbrüche, ca. 400 fehlende Messungen
21.11.10	Mittlere Einbrüche, ca. 80 fehlende Messungen
22.11.10	Starke Einbrüche, nur bis 19 Uhr
23.11.10	Starke Einbrüche, nur von 8.52 bis 19.07 Uhr
24.11.10	Starke Einbrüche, erst ab 9.48 Uhr
25.11.10	Starke Einbrüche, nur bis 15.34 Uhr
26.11.10	Starke Einbrüche, erst ab 6.47 uhr
27.11.10	Starke Einbrüche
28.11.10	Nur bis 9 Uhr
29.11.10	Einbrüche, nur von 9-11 Uhr
30.11.10	Keine Daten vorhanden

Juli 2011

Tabelle 9 : Datenqualität Juli 2011

Datum	Vollständigkeit	Fehlerbehaftet	Qualität der Globalstrahlung	Globalstrahlung [W/m ²]
01.07.11	++	+	++	511,564606
02.07.11	++	---	++	493,6605148
03.07.11	++	---	++	487,6433518
04.07.11	++	---	++	402,8286074
05.07.11	+	---	++	431,9488394
06.07.11	+	---	++	443,9941061
07.07.11	++	---	++	368,3841727
08.07.11	++	---	++	489,7127246
09.07.11	++	---	++	431,8787219
10.07.11	++	---	++	473,5354965
11.07.11	++	---	++	478,2734244
12.07.11	++	---	++	507,3908074
13.07.11	++	---	+	495,8080637
14.07.11	++	---	++	494,9980653
15.07.11	++	---	++	495,7723203
16.07.11	++	---	++	493,6522788
17.07.11	++	---	++	516,4577126
18.07.11	++	---	++	514,3531905
19.07.11	++	---	++	483,5263031
20.07.11	+	---	++	465,1896799
21.07.11	++	---	++	470,5215403
22.07.11	++	---	++	424,7937575
23.07.11	++	---	++	411,9845783
24.07.11	++	---	++	420,5926636
25.07.11	++	---	++	554,8517806
26.07.11	++	---	++	540,1888782
27.07.11	++	---	++	460,711293
28.07.11	++	---	0	465,056372
29.07.11	++	---	++	531,8644557
30.07.11	++	---	++	512,4124307
31.07.11	++	---	++	451,1305595

Tabelle 10 : Bemerkungen zu den einzelnen Tagen im Juli 2011

Datum 2	Bemerkungen
01.07.11	Neg. Werte sig_valve, peak nur 850
02.07.11	peak 850
03.07.11	peak 850
04.07.11	peak 900
05.07.11	peak 850, 11 Messungen fehlen
06.07.11	30 Messungen fehlen
07.07.11	peak 750
08.07.11	4 Messungen fehlen, peak 820
09.07.11	
10.07.11	
11.07.11	
12.07.11	
13.07.11	11 Messungen fehlen, Leichter Einbruch am Mittag
14.07.11	
15.07.11	
16.07.11	
17.07.11	
18.07.11	
19.07.11	
20.07.11	12 Messungen fehlen
21.07.11	
22.07.11	
23.07.11	Minimaler Einbruch am Mittag
24.07.11	
25.07.11	
26.07.11	
27.07.11	11 Messungen fehlen
28.07.11	Einbrüche von bis zu 400 W/m ²
29.07.11	
30.07.11	
31.07.11	

Dezember 2011

Tabelle 11 : Datenqualität Dezember 2011

Datum	Vollständigkeit	Fehlerbehaftet	Qualität der Globalstrahlung	Globalstrahlung [W/m ²]
01.12.11	++	--	--	186,51
02.12.11	++	--	-	297,79
03.12.11	++	--	-	263,17
04.12.11	++	+	-	284,90
05.12.11	++	+	--	161,89
06.12.11	++	+	--	109,29
07.12.11	++	--	-	271,61
08.12.11	++	+	--	207,77
09.12.11	++	+	-	297,46
10.12.11	++	+	++	321,55
11.12.11	++	+	+	324,11
12.12.11	++	+	++	331,99
13.12.11	++	+	++	334,09
14.12.11	+	+	++	334,72
15.12.11	++	+	+++	330,84
16.12.11	++	+	+	324,60
17.12.11	++	+	+	325,55
18.12.11	++	+	-	199,38
19.12.11	++	+	-	203,92
20.12.11	++	--	--	58,15
21.12.11	+	+	--	135,12
22.12.11	++	+	-	287,31
23.12.11	++	+	++	321,46
24.12.11	++	+	+	323,72
25.12.11	++	+	+	318,21
26.12.11	++	+	+	306,69
27.12.11	++	+	--	194,04
28.12.11	+	+	-	286,39
29.12.11	++	+	+	330,34
30.12.11	++	+	+	330,09
31.12.11	++	+	++	324,74

Tabelle 12 : Bemerkungen zu den einzelnen Tagen im Dezember 2011

Datum2	Bemerkung
01.12.11	Max Strahlung zwar bei 1346, allerdings starke Einbrüche/Schwankungen
02.12.11	Konstante Einbrüche über der ganzen Tag
03.12.11	Konstante Einbrüche, Strahlung steigt sehr früh an
04.12.11	negative Werte bei sig_valve, leichte Einbrüche am morgen, stark zunehmend am Mittag
05.12.11	negative Werte bei sig_valve, Strahlung steigt spät an und flacht früh ab, Starke Einbrüche
06.12.11	steigt langsam, kurzer peak zw. 14-16 Uhr, negative Werte, Einbrüche
07.12.11	Peak zwischen 8-16 Uhr, starke Einbrüche
08.12.11	Peak zwischen 5,30 und 14 Uhr, negative Werte
09.12.11	Starker Einbruch am Mittag, negative Werte
10.12.11	leichte Einbrüche am Morgen, max 1100, negative Werte
11.12.11	glockenform noch erkennbar, Einbrüche, negative Werte
12.12.11	Keine Einbrüche, negative Werte
13.12.11	Keine Einbrüche, negative Werte
14.12.11	leichte Einbrüche am Abend, fehlende Werte zw. 4.30 und 4,32 Uhr neg, Werte
15.12.11	negative Werte
16.12.11	leichte einbrüche am Morgen
17.12.11	starke Einbrüche am Nachmittag, negative Werte
18.12.11	Starke Einbrüche über den ganzen Tag, neg. Werte
19.12.11	Starke Einbrüche über den ganzen Tag, neg. Werte
20.12.11	Starke Einbrüche über den ganzen Tag, neg. Werte
21.12.11	starke Einbrüche am Nachmittag, negative Werte, fehlende Werte zwischen 4.30 und 4.32 Uhr
22.12.11	Einbrüche, breite Streuung, neg. Werte
23.12.11	leichte Einbruch am Morgen, neg. Werte
24.12.11	Starker Einbruch am Mittag, negative Werte
25.12.11	Starker Einbruch nach Mittag, neg. Werte
26.12.11	Diverse leichte Einbrüche, neg. Werte
27.12.11	Starke Einbrüche, Peak bei 600, neg. Werte
28.12.11	Starker Einbruch, Fehlende Messung zw. 4.30 und 4.32, neg. Werte
29.12.11	ein kurzer Einbruch am Mittag, neg. Werte
30.12.11	ein kurzer Einbruch am Mittag, neg. Werte
31.12.11	Diverse leichte Einbrüche, neg. Werte

C. Wärmeströme

November 2010

Tabelle 13 : Auswertung November Teil 1

Datum	Q-solar	Q_1H_bolz	Q_1C_bolz	Q_1H_rechen	Q_1C_Rechen
01.11.10	526,12	203,78	193,59	217,51	206,63
02.11.10	531,54	492,98	468,33	130,70	124,17
03.11.10	534,18	342,56	325,43	293,74	279,05
04.11.10	532,45	379,29	360,32	257,34	244,48
05.11.10	528,63	360,24	342,23	0,00	0,00
06.11.10	533,47	336,84	320,00	0,00	0,00
07.11.10	529,89	326,33	310,01	0,00	0,00
08.11.10	526,51	413,99	393,29	126,13	119,82
09.11.10	543,02	248,78	236,34	292,05	277,45
10.11.10	552,76	246,86	234,52	284,15	269,94
11.11.10	544,22	338,43	321,51	0,00	0,00
12.11.10	521,04	221,57	210,50	0,00	0,00
13.11.10	457,59	222,30	211,19	139,55	132,57
14.11.10	277,21	148,47	141,05	104,29	99,07
15.11.10	363,08	249,08	236,62	0,00	0,00
16.11.10	281,93	109,40	103,93	0,00	0,00
17.11.10	382,24	212,54	201,91	0,00	0,00
18.11.10	372,67	144,43	137,20	138,63	131,70
19.11.10	400,17	177,83	168,94	111,70	106,11
20.11.10	452,86	189,94	180,44	0,00	0,00
21.11.10	502,09	203,69	193,50	90,04	85,54
22.11.10	434,97	250,66	238,12	138,39	131,47
23.11.10	405,32	312,38	296,76	0,00	0,00
24.11.10	439,77	399,19	379,23	0,00	0,00
25.11.10	367,12	340,47	323,44	0,00	0,00
26.11.10	295,62	147,47	140,10	0,00	0,00
27.11.10	387,96	189,81	180,32	0,00	0,00
28.11.10	10,72	1,58	1,50	0,00	0,00
29.11.10	71,48	25,92	24,62	38,02	36,12
30.11.10					
Mittelwerte	424,37	249,55	237,07	168,73	160,29

Tabelle 14 : Auswertung November Teil 2

Datum	Storage_use	Solar_use	load in storag	Q_2H	Q_2C
01.11.10	145,51	109,11	108,40	267,35	254,62
02.11.10	226,54	21,40	109,31	260,30	247,90
03.11.10	265,61	121,65	172,09	406,62	387,25
04.11.10	304,76	91,18	166,16	415,74	395,94
05.11.10	0,00	0,01	0,00	34,38	32,74
06.11.10	0,00	0,17	0,00	0,23	0,22
07.11.10	0,00	0,04	0,00	0,22	0,21
08.11.10	227,05	2,07	124,06	240,58	229,12
09.11.10	181,47	135,83	156,23	333,16	317,30
10.11.10	171,81	134,21	149,94	321,32	306,02
11.11.10	0,00	4,56	0,00	175,19	166,85
12.11.10	0,00	10,26	0,00	23,32	22,21
13.11.10	116,04	63,42	76,13	188,43	179,46
14.11.10	214,00	0,00	104,29	224,70	214,00
15.11.10	0,00	0,00	0,00	132,01	125,73
16.11.10	0,00	0,00	0,00	79,79	75,99
17.11.10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18.11.10	0,25	88,10	50,53	92,78	88,36
19.11.10	10,15	60,86	50,83	74,56	71,01
20.11.10	0,00	0,49	0,00	0,00	0,00
21.11.10	0,64	41,94	0,00	44,72	42,59
22.11.10	3,06	73,08	65,32	79,94	76,14
23.11.10	0,00	22,15	0,00	42,74	40,71
24.11.10	0,00	1,95	0,00	189,08	180,07
25.11.10	0,00	4,54	0,00	113,06	107,67
26.11.10	0,00	0,00	0,00	117,64	112,04
27.11.10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28.11.10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
29.11.10	0,00	1,81	0,00	1,90	1,81
30.11.10					
Mittelwerte	143,61	44,95	111,11	154,39	147,04

Tabelle 15 : Auswertung November Teil 3

Datum	Q_1C=Q_2C	eta_coll_bolz_1H	Q_2C/Q_solar	Q_2C/Q_1H_bolz
01.11.10	111,09	0,39	0,48	1,25
02.11.10	114,49	0,93	0,47	0,50
03.11.10	177,10	0,64	0,72	1,13
04.11.10	178,80	0,71	0,74	1,04
05.11.10	12,55	0,68	0,06	0,09
06.11.10	0,08	0,63	0,00	0,00
07.11.10	0,11	0,62	0,00	0,00
08.11.10	102,14	0,79	0,44	0,55
09.11.10	155,00	0,46	0,58	1,28
10.11.10	131,19	0,45	0,55	1,24
11.11.10	76,62	0,62	0,31	0,49
12.11.10	10,82	0,43	0,04	0,10
13.11.10	73,53	0,49	0,39	0,81
14.11.10	109,77	0,54	0,77	1,44
15.11.10	61,32	0,69	0,35	0,50
16.11.10	31,75	0,39	0,27	0,69
17.11.10	0,00	0,56	0,00	0,00
18.11.10	34,77	0,39	0,24	0,61
19.11.10	27,63	0,44	0,18	0,40
20.11.10	0,00	0,42	0,00	0,00
21.11.10	24,40	0,41	0,08	0,21
22.11.10	35,30	0,58	0,18	0,30
23.11.10	18,82	0,77	0,10	0,13
24.11.10	79,49	0,91	0,41	0,45
25.11.10	55,51	0,93	0,29	0,32
26.11.10	51,74	0,50	0,38	0,76
27.11.10	0,00	0,49	0,00	0,00
28.11.10	0,00	0,15	0,00	0,00
29.11.10	0,44	0,36	0,03	0,07
30.11.10				
Mittelwerte	66,98	0,56	0,32	0,58

Tabelle 16 : Auswertung November Teil 4

Datum	Tank +/-	eta_coll_1H	GOR_solar	GOR_2C
01.11.10	---37,11	0,41	1,32	2,84
02.11.10	---117,20	0,25	1,34	2,81
03.11.10	---93,52	0,55	1,47	2,62
04.11.10	---138,60	0,48	1,52	2,77
05.11.10	0,00	0,00	0,06	2,67
06.11.10	0,00	0,00	0,06	0,00
07.11.10	---0,21	0,00	0,00	0,00
08.11.10	---103,00	0,24	1,07	2,28
09.11.10	---25,24	0,54	1,29	2,34
10.11.10	---21,87	0,51	0,82	2,23
11.11.10	0,00	0,00	0,49	1,88
12.11.10	---11,93	0,02	0,47	0,90
13.11.10	---39,91	0,30	1,08	2,03
14.11.10	---109,72	0,38	0,99	1,45
15.11.10	---67,47	0,16	0,23	0,94
16.11.10	---45,83	0,11	0,18	0,50
17.11.10	0,00	0,00	0,00	0,00
18.11.10	50,27	0,37	0,92	2,48
19.11.10	40,68	0,28	0,90	1,66
20.11.10	---0,80	0,00	0,13	0,43
21.11.10	47,46	0,18	0,42	1,52
22.11.10	62,26	0,32	0,58	2,02
23.11.10	---1,18	0,10	0,83	1,84
24.11.10	---104,56	0,17	1,29	2,22
25.11.10	---51,96	0,15	1,43	1,66
26.11.10	---62,89	0,17	0,83	1,47
27.11.10	0,00	0,00	0,11	0,00
28.11.10	0,00	0,00	0,00	0,00
29.11.10	36,21	0,53	0,12	0,11
30.11.10				
Mittelwerte	47,38	0,30	0,77	1,82

Tabelle 17 : Auswertung November Teil 5

Datum	eta_coll_Q1=Q2	Bemerkungen
01.11.10	0,26	
02.11.10	0,31	
03.11.10	0,38	
04.11.10	0,39	
05.11.10	0,00	
06.11.10	0,00	kein V_p_feed
07.11.10	0,00	kein V_p_feed
08.11.10	0,28	
09.11.10	0,30	
10.11.10	0,30	
11.11.10	0,00	Kollektorpumpe und Entsalzungspumpe nicht in Betrieb
12.11.10	0,00	
13.11.10	0,21	
14.11.10	0,53	Kollektorpumpe nicht in Betrieb
15.11.10	0,20	Kollektorpumpe nicht in Betrieb
16.11.10	0,22	Kollektorpumpe nicht in Betrieb
17.11.10	0,00	Feedpumpe nicht in Betrieb Tmax <30°C
18.11.10	0,40	
19.11.10	0,28	
20.11.10	0,00	Feed und Kollektorpumpe nicht in Betrieb
21.11.10	0,13	
22.11.10	0,22	
23.11.10	0,12	
24.11.10	0,35	Kollektorpumpe nicht in Betrieb
25.11.10	0,22	
26.11.10	0,42	Kollektorpumpe nicht in Betrieb, sig_valve=0
27.11.10	0,00	Feed und Kollektorpumpe nicht in Betrieb
28.11.10	0,00	Feed und Kollektorpumpe nicht in Betrieb
29.11.10	0,43	Feedpumpe nicht in Betrieb
30.11.10		
Mittelwerte	0,30	

Tabelle 18 : Auswertung November Teil 6

Datum	Q_2C/Q_1H	Q1H/qsolar	Q1C/Qsolar	load in	storage	Q2H/Qsolar
01.11.10	1,17	0,4	0,39	0,2	0,27	0,50
02.11.10	1,90	0,2	0,23	0,2	0,42	0,49
03.11.10	1,32	0,5	0,52	0,3	0,49	0,76
04.11.10	1,54	0,4	0,45	0,3	0,57	0,78
05.11.10	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,06
06.11.10	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,00
07.11.10	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,00
08.11.10	1,82	0,2	0,22	0,2	0,43	0,45
09.11.10	1,09	0,5	0,51	0,2	0,33	0,61
10.11.10	1,08	0,5	0,48	0,2	0,31	0,58
11.11.10	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,00
12.11.10	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,04
13.11.10	1,29	0,3	0,29	0,1	0,25	0,41
14.11.10	2,05	0,0	0,00	0,0	0,00	0,00
15.11.10	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,36
16.11.10	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,28
17.11.10	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,00
18.11.10	0,64	0,3	0,35	0,1	0,00	0,24
19.11.10	0,64	0,2	0,26	0,1	0,02	0,18
20.11.10	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,00
21.11.10	0,47	0,1	0,17	0,0	0,00	0,08
22.11.10	0,55	0,3	0,30	0,1	0,00	0,18
23.11.10	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,10
24.11.10	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,43
25.11.10	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,30
26.11.10	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,39
27.11.10	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,00
28.11.10	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,00
29.11.10	0,05	0,5	0,50	0,0	0,00	0,02
30.11.10	0,00					
	0,00					
Mittelwerte	1,11	0,3	0,36	0,2	0,26	0,31

Juli 2011

Tabelle 19 : Auswertung Juli Teil I

Datum	Q---solar	Q_1H_bolz	Q_1C_bolz	Q_1H_rechen	Q_1C_Rechen
01.07.11	408,13	1,08	1,02	0,00	0,83
02.07.11	393,07	0,00	0,00	0,00	0,00
03.07.11	408,58	0,00	0,00	0,00	0,00
04.07.11	370,95	14,95	14,20	15,52	14,78
05.07.11	352,73	6,94	6,59	18,62	17,69
06.07.11	349,73	13,74	13,06	48,91	46,47
07.07.11	346,50	223,60	212,42	123,41	117,24
08.07.11	390,00	622,35	591,23	249,34	236,88
09.07.11	344,94	200,68	190,65	238,06	226,15
10.07.11	390,00	202,64	192,51	104,06	98,85
11.07.11	385,86	209,81	199,32	250,71	261,40
12.07.11	403,37	216,11	205,30	277,09	270,77
13.07.11	397,14	213,39	202,72	262,28	207,88
14.07.11	395,72	216,76	205,93	283,99	212,93
15.07.11	396,16	212,95	202,31	271,82	235,18
16.07.11	395,81	213,65	202,97	289,66	289,70
17.07.11	415,58	224,82	213,58	314,71	271,70
18.07.11	422,41	222,19	211,08	298,14	194,38
19.07.11	387,40	215,91	205,12	283,38	220,75
20.07.11	376,67	220,81	209,77	261,47	252,09
21.07.11	377,99	220,34	209,32	278,33	264,43
22.07.11	342,07	192,31	182,70	219,78	209,32
23.07.11	330,55	191,67	182,08	218,39	207,47
24.07.11	339,22	201,02	190,97	243,59	231,41
25.07.11	446,12	241,17	229,11	288,22	273,81
26.07.11	436,04	235,97	224,18	260,07	247,07
27.07.11	370,08	204,13	193,92	234,45	222,73
28.07.11	373,28	217,05	206,19	240,97	228,92
29.07.11	427,98	224,16	212,95	252,60	239,97
30.07.11	411,22	216,32	205,51	270,29	256,78
31.07.11	364,75	196,51	186,68	218,55	207,62
Mittelwerte	385,49	186,87	177,53	203,78	185,97

Tabelle 20 : Auswertung Juli Teil 2

Datum	Storage_use	Solar_use	load in stora	Q_2H	Q_2C
01.07.11	1,24	0,00	0,87	1,30	1,24
02.07.11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
03.07.11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
04.07.11	36,04	0,00	15,52	37,84	36,04
05.07.11	0,00	14,75	3,87	15,49	14,75
06.07.11	--3,25	25,26	23,65	23,12	22,02
07.07.11	6,77	78,68	44,73	89,53	85,27
08.07.11	81,31	138,37	110,97	230,66	219,68
09.07.11	50,60	138,77	99,28	198,84	189,37
10.07.11	219,68	0,00	104,06	230,66	219,68
11.07.11	77,03	146,39	104,31	234,59	223,42
12.07.11	91,40	150,30	126,78	253,78	241,70
13.07.11	79,57	148,46	113,82	239,44	228,03
14.07.11	97,66	150,27	133,72	260,32	247,92
15.07.11	83,25	150,64	121,18	245,58	233,88
16.07.11	100,39	151,10	138,56	264,06	251,49
17.07.11	118,42	155,63	159,08	287,75	274,05
18.07.11	104,48	156,27	141,86	273,79	260,75
19.07.11	94,02	149,13	134,25	255,31	243,15
20.07.11	106,99	141,96	119,51	261,40	248,95
21.07.11	115,05	142,83	135,50	270,77	257,88
22.07.11	67,54	130,44	89,34	207,88	197,98
23.07.11	74,69	128,10	90,29	212,93	202,79
24.07.11	92,67	131,31	112,28	235,18	223,98
25.07.11	120,09	155,82	132,40	289,70	275,91
26.07.11	113,22	145,54	114,54	271,70	258,76
27.07.11	53,25	131,89	102,57	194,38	185,12
28.07.11	75,43	134,81	106,17	220,75	210,23
29.07.11	95,08	145,01	107,59	252,09	240,09
30.07.11	112,42	139,42	130,88	264,43	251,84
31.07.11	57,19	124,55	94,00	190,83	181,74
Mittelwerte	74,91	109,86	93,92	194,00	184,76

Tabelle 21 : Auswertung Juli Teil 3

Datum	Q_1C=Q_2C	eta_coll_bolz_1H	Q_2C/Q_sol	Q_2C/Q_1H
01.07.11	0,83	0,00	0,00	1,15
02.07.11	0,00	0,00	0,00	0,00
03.07.11	0,00	0,00	0,00	0,00
04.07.11	14,78	0,04	0,10	2,41
05.07.11	2,98	0,02	0,04	2,13
06.07.11	21,32	0,04	0,06	1,60
07.07.11	38,85	0,65	0,25	0,38
08.07.11	99,10	1,60	0,56	0,35
09.07.11	87,95	0,58	0,55	0,94
10.07.11	99,10	0,52	0,56	1,08
11.07.11	92,38	0,54	0,58	1,06
12.07.11	113,59	0,54	0,60	1,12
13.07.11	101,33	0,54	0,57	1,07
14.07.11	120,20	0,55	0,63	1,14
15.07.11	108,23	0,54	0,59	1,10
16.07.11	124,77	0,54	0,64	1,18
17.07.11	144,09	0,54	0,66	1,22
18.07.11	127,67	0,53	0,62	1,17
19.07.11	120,76	0,56	0,63	1,13
20.07.11	107,06	0,59	0,66	1,13
21.07.11	122,24	0,58	0,68	1,17
22.07.11	78,87	0,56	0,58	1,03
23.07.11	79,89	0,58	0,61	1,06
24.07.11	100,68	0,59	0,66	1,11
25.07.11	118,67	0,54	0,62	1,14
26.07.11	102,15	0,54	0,59	1,10
27.07.11	91,40	0,55	0,50	0,91
28.07.11	94,69	0,58	0,56	0,97
29.07.11	95,56	0,52	0,56	1,07
30.07.11	118,01	0,53	0,61	1,16
31.07.11	83,59	0,54	0,50	0,92
Mittelwerte	84,22	0,48	0,48	1,06

Tabelle 22 : Auswertung Juli Teil 4

Datum	Tank +/-	eta_coll	GOR_solar	GOR_2C	eta_coll_Q1
01.07.11	--0,36	0,00	0,32	1,53	0,00
02.07.11	0,00	0,00	0,21	0,00	0,00
03.07.11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
04.07.11	--20,52	0,04	0,63	2,28	0,00
05.07.11	3,87	0,05	0,52	1,66	0,00
06.07.11	26,89	0,14	0,44	1,96	0,00
07.07.11	38,14	0,36	1,48	4,06	0,00
08.07.11	29,67	0,64	2,74	4,08	0,46
09.07.11	48,68	0,69	2,96	3,89	0,52
10.07.11	--115,62	0,27	2,74	4,08	0,46
11.07.11	27,29	0,65	2,94	3,87	0,50
12.07.11	35,39	0,69	2,87	3,82	0,49
13.07.11	34,25	0,66	2,82	3,81	0,50
14.07.11	36,07	0,72	2,89	3,81	0,50
15.07.11	37,93	0,69	2,89	3,82	0,48
16.07.11	38,17	0,73	2,94	3,83	0,50
17.07.11	40,66	0,76	2,85	3,80	0,48
18.07.11	37,38	0,71	2,85	3,86	0,48
19.07.11	40,23	0,73	2,96	4,01	0,48
20.07.11	12,51	0,69	2,89	4,07	0,45
21.07.11	20,45	0,74	3,00	4,07	0,46
22.07.11	21,80	0,64	3,03	4,10	0,47
23.07.11	15,60	0,66	3,13	4,08	0,47
24.07.11	19,61	0,72	3,25	4,01	0,48
25.07.11	12,31	0,65	2,65	3,97	0,47
26.07.11	1,31	0,60	2,62	4,02	0,43
27.07.11	49,33	0,63	2,59	3,97	0,49
28.07.11	30,74	0,65	3,05	3,94	0,49
29.07.11	12,51	0,59	2,69	4,02	0,45
30.07.11	18,46	0,66	2,71	3,94	0,47
31.07.11	36,80	0,60	2,61	3,91	0,50
Mittelwerte	19,02	0,58	2,33	3,43	0,48

Tabelle 23 : Auswertung Juli Teil 5

Datum4	Q_2C/Q_1H	Bemerkungen
01.07.11	0,00	Temperatur max 60°C sig_valve negativ
02.07.11	0,00	keine Volumenströme
03.07.11	0,00	keine Volumenströme
04.07.11	0,00	sig valve negativ, Temperaturen max. 60°C, V_p Feed von
05.07.11	0,79	Temperatureinbruch von 0.00 bis 10 Uhr Volumenströme von
06.07.11	0,45	Volumenströme ab Mittag, Temperatureinbruch morgens,
07.07.11	0,69	Volumenströme nur bis 17Uhr, Temperatureinbruch zwischen
08.07.11	0,88	Volumenströme ab 9 Uhr Temperatureinbruch am Morgen
09.07.11	0,80	Volumenströme zwischen 9 und 20Uhr, Temperatureinbruch
10.07.11	1,08	Volumenströme von 9 bis 21 Uhr
11.07.11	0,89	
12.07.11	0,87	
13.07.11	0,87	
14.07.11	0,87	
15.07.11	0,86	
16.07.11	0,87	
17.07.11	0,87	
18.07.11	0,87	
19.07.11	0,86	
20.07.11	0,95	
21.07.11	0,93	
22.07.11	0,90	
23.07.11	0,93	
24.07.11	0,92	
25.07.11	0,96	
26.07.11	0,99	
27.07.11	0,79	
28.07.11	0,87	
29.07.11	0,95	
30.07.11	0,93	
31.07.11	0,83	
Mittelwerte	0,91	

Tabelle 24 : Auswertung Juli Teil 6

Datum	load in storage/storage use/QsoQ2H/QsolarQ1H/Qsolar				Q1C/Qsolar
01.07.11	0,002	0,003	0,003	0,000	0,002
02.07.11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
03.07.11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
04.07.11	0,042	0,097	0,102	0,042	0,040
05.07.11	0,011	0,000	0,044	0,053	0,050
06.07.11	0,068	--0,009	0,066	0,140	0,133
07.07.11	0,129	0,020	0,258	0,356	0,338
08.07.11	0,285	0,208	0,591	0,639	0,607
09.07.11	0,288	0,147	0,576	0,690	0,656
10.07.11	0,267	0,563	0,591	0,267	0,253
11.07.11	0,270	0,200	0,608	0,650	0,677
12.07.11	0,314	0,227	0,629	0,687	0,671
13.07.11	0,287	0,200	0,603	0,660	0,523
14.07.11	0,338	0,247	0,658	0,718	0,538
15.07.11	0,306	0,210	0,620	0,686	0,594
16.07.11	0,350	0,254	0,667	0,732	0,732
17.07.11	0,383	0,285	0,692	0,757	0,654
18.07.11	0,336	0,247	0,648	0,706	0,460
19.07.11	0,347	0,243	0,659	0,731	0,570
20.07.11	0,317	0,284	0,694	0,694	0,669
21.07.11	0,358	0,304	0,716	0,736	0,700
22.07.11	0,261	0,197	0,608	0,643	0,612
23.07.11	0,273	0,226	0,644	0,661	0,628
24.07.11	0,331	0,273	0,693	0,718	0,682
25.07.11	0,297	0,269	0,649	0,646	0,614
26.07.11	0,263	0,260	0,623	0,596	0,567
27.07.11	0,277	0,144	0,525	0,634	0,602
28.07.11	0,284	0,202	0,591	0,646	0,613
29.07.11	0,251	0,222	0,589	0,590	0,561
30.07.11	0,318	0,273	0,643	0,657	0,624
31.07.11	0,258	0,157	0,523	0,599	0,569
	0,000				
Mittelwerte	0,259	0,221	0,535	0,583	0,515

Dezember 2011

Tabelle 25 : Auswertung Dezember Teil I

Datum	Q--solar	Q_1H_bolz	Q_1C_bolz	Q_1H_rechen
01.12.11	311,55	183,06	173,91	104,99
02.12.11	497,43	243,09	230,94	206,38
03.12.11	439,60	217,36	206,49	184,34
04.12.11	475,90	235,70	223,92	203,95
05.12.11	270,43	166,42	158,10	73,62
06.12.11	182,56	116,39	110,57	22,60
07.12.11	453,18	219,33	208,36	205,60
08.12.11	347,06	179,50	170,52	145,14
09.12.11	496,88	231,60	220,02	207,25
10.12.11	537,11	245,93	233,64	236,46
11.12.11	541,39	243,44	231,27	237,63
12.12.11	554,56	240,95	228,90	245,72
13.12.11	558,06	240,72	228,68	251,78
14.12.11	558,47	265,69	252,41	56,92
15.12.11	552,64	245,37	233,10	261,43
16.12.11	542,20	243,31	231,14	247,53
17.12.11	543,81	244,15	231,94	235,85
18.12.11	333,04	171,74	163,16	125,22
19.12.11	340,63	175,74	166,96	141,47
20.12.11	97,14	78,81	74,87	0,00
21.12.11	225,44	122,20	116,09	66,04
22.12.11	479,92	232,85	221,21	185,62
23.12.11	536,97	242,62	230,48	211,71
24.12.11	540,74	249,97	237,48	218,81
25.12.11	531,54	246,84	234,50	233,50
26.12.11	512,30	244,73	232,49	217,38
27.12.11	324,13	181,36	172,29	97,66
28.12.11	477,84	225,56	214,28	215,38
29.12.11	551,80	248,89	236,45	235,16
30.12.11	551,39	247,06	234,71	242,77
31.12.11	542,44	253,02	240,37	228,65
Mittelwerte	448,65	215,59	204,81	184,89

Tabelle 26 : Auswertung Dezember Teil 2

Datum	Q_1C_Rechen	Storage_use	Solar_use	load in storaQ_2H	
01.12.11	99,99	7,71	59,49	45,51	70,55
02.12.11	196,55	25,00	133,38	73,00	166,30
03.12.11	175,56	20,79	111,92	72,42	139,34
04.12.11	194,24	18,60	131,24	72,72	157,33
05.12.11	70,11	5,58	42,08	31,54	50,04
06.12.11	21,52	5,42	13,24	9,35	19,53
07.12.11	195,81	10,87	127,82	77,78	145,63
08.12.11	138,23	5,71	90,45	54,69	100,97
09.12.11	197,38	17,89	133,58	73,67	159,05
10.12.11	225,20	31,90	142,03	94,43	182,63
11.12.11	226,31	41,93	138,80	98,83	189,76
12.12.11	234,02	39,90	145,16	100,56	194,31
13.12.11	239,79	34,44	148,59	103,19	192,18
14.12.11	54,21	112,74	4,17	52,75	122,76
15.12.11	248,36	87,59	142,51	118,91	241,61
16.12.11	235,15	45,87	142,76	104,77	198,06
17.12.11	224,06	48,78	141,72	94,13	200,02
18.12.11	118,96	5,30	77,33	47,89	86,77
19.12.11	134,40	8,62	87,11	54,36	100,52
20.12.11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21.12.11	62,74	7,01	41,16	24,88	50,58
22.12.11	176,34	11,41	114,96	70,66	132,69
23.12.11	201,63	12,99	135,02	76,69	155,41
24.12.11	208,39	36,96	137,04	81,78	182,70
25.12.11	222,38	34,46	136,34	97,17	179,34
26.12.11	207,03	24,82	132,62	84,76	165,31
27.12.11	93,01	4,99	64,31	33,35	72,77
28.12.11	205,13	13,01	124,25	91,14	144,12
29.12.11	223,96	41,24	138,83	96,33	189,07
30.12.11	231,21	43,77	139,50	103,27	192,44
31.12.11	217,77	43,68	134,66	93,99	187,27
Mittelwerte	175,98	28,30	110,40	74,48	145,63

Tabelle 27 : Auswertung Dezember Teil 3

Datum3	Q_2C	Q_1C=Q_2C	eta_coll_bolz_1H	eta_coll_rechen_1H
01.12.11	67,19	40,51	0,59	0,34
02.12.11	158,38	63,18	0,49	0,41
03.12.11	132,71	63,64	0,49	0,42
04.12.11	149,84	63,00	0,50	0,43
05.12.11	47,66	28,03	0,62	0,27
06.12.11	18,60	8,28	0,64	0,12
07.12.11	138,69	67,99	0,48	0,45
08.12.11	96,16	47,78	0,52	0,42
09.12.11	151,47	63,80	0,47	0,42
10.12.11	173,93	83,17	0,46	0,44
11.12.11	180,73	87,52	0,45	0,44
12.12.11	185,06	88,86	0,43	0,44
13.12.11	183,03	91,20	0,43	0,45
14.12.11	116,91	50,04	0,48	0,10
15.12.11	230,10	106,47	0,44	0,47
16.12.11	188,63	92,98	0,45	0,46
17.12.11	190,50	82,90	0,45	0,43
18.12.11	82,63	41,93	0,52	0,38
19.12.11	95,74	47,62	0,52	0,42
20.12.11	0,00	0,00	0,81	0,00
21.12.11	48,17	21,74	0,54	0,29
22.12.11	126,38	61,82	0,49	0,39
23.12.11	148,01	66,61	0,45	0,39
24.12.11	174,00	71,36	0,46	0,40
25.12.11	170,80	86,05	0,46	0,44
26.12.11	157,44	74,40	0,48	0,42
27.12.11	69,30	28,70	0,56	0,30
28.12.11	137,25	80,88	0,47	0,45
29.12.11	180,06	85,13	0,45	0,43
30.12.11	183,27	91,71	0,45	0,44
31.12.11	178,35	83,10	0,47	0,42
Mittelwerte	138,70	65,68	0,50	0,39

Tabelle 28 : Auswertung Dezember Teil 4

Datum	eta_coll_Q1=Q2	Q_2C/Q_sol	Q_2C/Q_1b	Q_2C/Q_1H_rechen	Tank +/-
01.12.11	0,22	0,22	0,37	0,64	37,80
02.12.11	0,36	0,32	0,65	0,77	48,00
03.12.11	0,39	0,30	0,61	0,72	51,63
04.12.11	0,37	0,31	0,64	0,73	54,12
05.12.11	0,33	0,18	0,29	0,65	25,96
06.12.11	0,36	0,10	0,16	0,82	4,00
07.12.11	0,37	0,31	0,63	0,67	66,91
08.12.11	0,35	0,28	0,54	0,66	48,98
09.12.11	0,35	0,30	0,65	0,73	55,78
10.12.11	0,36	0,32	0,71	0,74	62,53
11.12.11	0,36	0,33	0,74	0,76	56,90
12.12.11	0,36	0,33	0,77	0,75	60,66
13.12.11	0,36	0,33	0,76	0,73	68,75
14.12.11	0,51	0,21	0,44	0,00	---59,99
15.12.11	0,34	0,42	0,94	0,88	31,32
16.12.11	0,34	0,35	0,78	0,76	58,90
17.12.11	0,34	0,35	0,78	0,81	45,35
18.12.11	0,36	0,25	0,48	0,66	42,59
19.12.11	0,35	0,28	0,54	0,68	45,74
20.12.11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21.12.11	0,40	0,21	0,39	0,73	17,87
22.12.11	0,32	0,26	0,54	0,68	59,25
23.12.11	0,32	0,28	0,61	0,70	63,70
24.12.11	0,36	0,32	0,70	0,80	44,82
25.12.11	0,32	0,32	0,69	0,73	62,71
26.12.11	0,34	0,31	0,64	0,72	59,94
27.12.11	0,28	0,21	0,38	0,71	28,36
28.12.11	0,34	0,29	0,61	0,64	78,13
29.12.11	0,33	0,33	0,72	0,77	55,09
30.12.11	0,35	0,33	0,74	0,75	59,50
31.12.11	0,34	0,33	0,70	0,78	50,31
Mittelwerte	0,35	0,29	0,61	0,73	49,85

Tabelle 29 : Auswertung Dezember Teil 5

Datum	GOR_solar	GOR_2C	Bemerkungen
01.12.11	1,11	3,36	Tmax 60°C
02.12.11	1,57	3,65	
03.12.11	1,70	3,52	
04.12.11	1,64	3,52	
05.12.11	1,11	3,27	
06.12.11	1,07	2,47	geringe V_p
07.12.11	1,63	3,67	
08.12.11	1,34	3,43	
09.12.11	1,44	3,40	
10.12.11	1,51	3,52	
11.12.11	1,44	3,46	
12.12.11	1,51	3,38	
13.12.11	1,49	3,37	
14.12.11	1,64	3,36	V_p nur am Abend
15.12.11	1,48	3,29	
16.12.11	1,56	3,24	
17.12.11	1,66	3,29	
18.12.11	1,32	3,07	
19.12.11	1,36	3,21	
20.12.11	0,00	0,00	keine Volumenströme
21.12.11	1,38	3,13	V_p nur zwischen 10.30 und 14 Uhr
22.12.11	1,13	3,22	
23.12.11	1,22	3,26	
24.12.11	1,26	3,21	
25.12.11	1,48	3,20	
26.12.11	1,30	3,21	
27.12.11	0,81	2,88	
28.12.11	1,32	3,15	
29.12.11	1,34	3,16	
30.12.11	1,34	3,16	
31.12.11	1,37	3,12	
Mittelwerte	1,38	3,27	

Tabelle 30 : Auswertung Dezember Teil 6

Datum	load in storastorage use/Q_solQ2H/QsolarQ1H/Qsolar Q1H/Qsolar				
01.12.11	0,146	0,025	0,226	0,337	0,321
02.12.11	0,147	0,050	0,334	0,415	0,395
03.12.11	0,165	0,047	0,317	0,419	0,399
04.12.11	0,153	0,039	0,331	0,429	0,408
05.12.11	0,117	0,021	0,185	0,272	0,259
06.12.11	0,051	0,030	0,107	0,124	0,118
07.12.11	0,172	0,024	0,321	0,454	0,432
08.12.11	0,158	0,016	0,291	0,418	0,398
09.12.11	0,148	0,036	0,320	0,417	0,397
10.12.11	0,176	0,059	0,340	0,440	0,419
11.12.11	0,183	0,077	0,351	0,439	0,418
12.12.11	0,181	0,072	0,350	0,443	0,422
13.12.11	0,185	0,062	0,344	0,451	0,430
14.12.11	0,094	0,202	0,220	0,102	0,097
15.12.11	0,215	0,158	0,437	0,473	0,449
16.12.11	0,193	0,085	0,365	0,457	0,434
17.12.11	0,173	0,090	0,368	0,434	0,412
18.12.11	0,144	0,016	0,261	0,376	0,357
19.12.11	0,160	0,025	0,295	0,415	0,395
20.12.11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
21.12.11	0,110	0,031	0,224	0,293	0,278
22.12.11	0,147	0,024	0,276	0,387	0,367
23.12.11	0,143	0,024	0,289	0,394	0,375
24.12.11	0,151	0,068	0,338	0,405	0,385
25.12.11	0,183	0,065	0,337	0,439	0,418
26.12.11	0,165	0,048	0,323	0,424	0,404
27.12.11	0,103	0,015	0,224	0,301	0,287
28.12.11	0,191	0,027	0,302	0,451	0,429
29.12.11	0,175	0,075	0,343	0,426	0,406
30.12.11	0,187	0,079	0,349	0,440	0,419
31.12.11	0,173	0,081	0,345	0,422	0,401
Mittelwerte	0,156	0,056	0,304	0,390	0,371

Literaturverzeichnis

Bücher

Herwig, H./Moschallski, A.(2009): Wärmeübertragung. Physikalische Grundlagen – Illustrierende Beispiele – Übungsaufgaben mit Musterlösungen. Wiesbaden: Vieweg Teubner

Hömig, H.-E., (1978): Seawater and Seawater Distillation, Fichtner-Handbook. Essen: Vulkan-Verlag

Wagemann, H.-G./Eschrich, H.(2010): Photovoltaik. Solarstrahlung und Halbleitereigenschaften, Solarzellenkonzepte und Aufgaben. Wiesbaden: Vieweg Teubner

Cerbe, G./Wilhelms, G. (2011): Technische Thermodynamik, Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen, München: Carl Hanser Verlag

Rizzutti, L. et. al., 2007: Solar Desalination for the 21st Century, Dordrecht: Springer

Sturm, M: Technische Verfahren zur Meer- und Brackwasserentsalzung. Darmstadt: TU Darmstadt, Institut WAR

Cipollina, A. et. Al., 2009: Seawater Desalination, Conventional and Renewable Energy processes, Berlin Heidelberg: Springer

Skripte

Cornel, P./Wagner, M. (2011): Grundlagen der Wasserver- und Entsorgung (Teil 2), Darmstadt: TU-Darmstadt-Skript

N.N.:Two Loop System „Elen“, CUVewaters Handbook

Weblinks

IEA/OECD, Bevölkerung OECD/World Bank: Energiebedarf nach Region und Zunahme 1990-2008
<http://de.wikipedia.org/wiki/Weltenergiebedarf> - [cite note-energi2010-3](#), Zugriff 17.05.2012

GrünSchwarz Blog: Kein Tropfen Wasser muss verloren gehen – Beispiel Singapur, Artikel vom 14. November 2011
<http://gruenschwarz.blog.de/2011/11/14/tropfen-wasser-verloren-gehen-beispiel-singapur-12165995/> Zugriff 20. Mai 2012

SolarServer: Das Internetportal zur Sonnenenergie
<http://www.solarserver.de/wissen/basiswissen/kollektoren.html>,
Zugriff 27.06.2012

ME-Systems: Systemhaus für Maschinen- und Energietechnik
<http://www.me-systems.eu/download/EcoSol.pdf>,
Zugriff 10.09.2012

Abschlussarbeit von:
Herrn Johannes Schwab

**Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß §23, Abs. 7
APB**

Hiermit versichere ich, die vorliegende Abschlussarbeit ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher Form oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den 13.09.2012

Unterschrift